

Markus Maurer · J. Christian Gerdes
Barbara Lenz · Hermann Winner *Hrsg.*

Autonomes Fahren

Technische, rechtliche
und gesellschaftliche Aspekte

Gefördert durch die:

Daimler und
Benz **Stiftung**



Springer Open

Autonomes Fahren

Markus Maurer • J. Christian Gerdes • Barbara Lenz
Hermann Winner (Hrsg.)

Autonomes Fahren

Technische, rechtliche und gesellschaftliche
Aspekte

Herausgeber

Markus Maurer
TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik,
Deutschland

Barbara Lenz
DLR Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin,
Deutschland

J. Christian Gerdes
Stanford University, Stanford, USA

Hermann Winner
Technische Universität Darmstadt, Darmstadt,
Deutschland

Gefördert durch die Daimler und Benz Stiftung

**Daimler und
Benz Stiftung**

ISBN 978-3-662-45853-2
DOI 10.1007/978-3-662-45854-9

ISBN 978-3-662-45854-9 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© The Editors and the Authors 2015. The book is published with open access at SpringerLink.com

Open Access This book is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

Jede kommerzielle Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Die Umschlagabbildung stammt aus Kapitel 2 „Use-Cases des autonomen Fahrens“

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Geleitwort

Vieles deutet darauf hin: Wir stehen am Vorabend einer weiteren mobilen Revolution. In Zukunft werden autonome Fahrzeuge aktiv am Straßenverkehr teilnehmen. Die dafür notwendigen Daten generieren sie mithilfe von Kameras bzw. Sensoren, die vom Rechner in Echtzeit innerhalb von Sekundenbruchteilen verarbeitet werden. Außerdem tauschen die Fahrzeuge untereinander sowie mit der Verkehrsinfrastruktur permanent Informationen aus. Dem Autofahrer werden sukzessive mehr und mehr Aufgaben durch Fahrroboter abgenommen.

Die technologische Perspektive des autonomen Fahrens ist gleichwohl nur eine Seite der Medaille. Ebenso werden autonome Fahrzeuge mittelbare Wirkungen auf unsere Gesellschaft haben, die wir gegenwärtig nur erahnen können. Zahlreiche kritische Fragen drängen sich auf: Wie wird es um das Thema Datensicherheit bestellt sein? Wie werden wir mit weitreichenden Eingriffen in unsere mobile Autonomie umgehen? Welche Probleme ergeben sich, wenn ein autonomes Fahrzeug Ländergrenzen überschreitet? In welcher Form haften künftig Versicherungen bei Unfällen durch autonome Fahrzeuge? Oder umgekehrt gefragt: Dürfen wir überhaupt noch Menschen ans Steuer lassen, sollten Fahrroboter die Sicherheit im Straßenverkehr nachweislich erhöhen?

Die Daimler und Benz Stiftung schätzt die gesellschaftliche Dimension dieser Veränderungen als zumindest ebenso gravierend ein wie die technologische. Innovative Technologien allein genügen nicht, um diese Entwicklungen zu gestalten und das automatisierte Fahren in unserer Gesellschaft zu verwirklichen. Deshalb sind wir gut beraten, uns solchen Fragen bereits heute zu stellen und diesen tiefgreifenden Wandel in der Mobilität nicht einfach als gegeben hinzunehmen, ihn auf uns „zurollen“ zu lassen. Um die ethischen, sozialen, juristischen, psychologischen oder verkehrstechnischen Rahmenbedingungen dieses Prozesses auszuleuchten, hat die Daimler und Benz Stiftung Wissenschaftler aus verschiedenen Fachbereichen gebeten, sich des Themas anzunehmen.

Das Kernteam des Projekts – Markus Maurer, Barbara Lenz, Hermann Winner und J. Christian Gerdes – identifizierte die aus seiner Sicht derzeit akuten Fragestellungen. Gleichzeitig etablierten die vier Wissenschaftler ein internationales Netzwerk aus renommierten Spezialisten, die ihre Sicht und ihre Erfahrungen in das Gespräch mit einbrachten. Das nun vorliegende Ergebnis, ein „Weißbuch“, analysiert die bereits erkennbaren Ent-

wicklungen aus interdisziplinärer Sicht. Es ist das vorläufige Resultat eines groß angelegten Förderprojekts: Unter dem Namen „Autonomes Fahren – Villa Ladenburg“ wurde es durch die Daimler und Benz Stiftung über einen Zeitraum von rund zwei Jahren mit einem Budget von 1,5 Millionen Euro ausgestattet. Unser erklärtes Ziel ist es, mit den vorliegenden Erkenntnissen eine objektive und unabhängige Informationsquelle zur Verfügung zu stellen.

Dieses Sondieren des Themas aus interdisziplinärer Perspektive halten wir für unverzichtbar. Im vorliegenden Band versuchen die Autoren deshalb eine erste umfassende Darstellung dessen, was wir zum gegenwärtigen Zeitpunkt als wissenschaftlich aussagbar erachten dürfen. Gleichzeitig müssen die noch schwer greifbaren neuen Technologien für potenzielle Nutzer wie für Betroffene erfahrbar gemacht werden. Solcherart entwickelt sich für viele Menschen eine Vorstellung, was sie erwarten können und was Technik überhaupt leisten kann – aber auch, was sie nicht wird leisten können.

Bereits jetzt wird deutlich, dass drei Aspekte in den Vordergrund treten: Zum einen wird ethischen Fragen eine Klammerfunktion zukommen. Erst wenn es gelingt, autonom agierenden Fahrzeugen eine Art von Entscheidungsethik mitzugeben, vermag sich die Fahrrobotik auch in der Praxis zu behaupten. Dies gilt insbesondere für sogenannte Dilemma-Situationen, in denen eine Abwägung getroffen werden muss, welches Verhalten im Falle einer unvermeidbaren Kollision den beteiligten Personen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs den geringsten Schaden zufügt. Eine weitere ungeklärte Schlüsselfrage ist, welche Konsequenzen hieraus für die Gesetzgebung (z. B. die Straßenverkehrsordnung) resultieren könnten.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung. Diese stößt aktuell an verschiedene Grenzen: Sensoren, Kameras oder zusammengesetzte Komponenten degenerieren und büßen im Lauf der Zeit an Zuverlässigkeit ein. Zwar ist es möglich, Zustandsunsicherheiten abzuschätzen und darüber die Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung zu prüfen. Doch werden Ausfälle tatsächlich vorhersagbar sein? Und wie wäre der sichere Zustand einer autonomen Maschine unter allen denkbaren Umständen überhaupt zu definieren? Dieser Aspekt kann sogar noch deutlich weiter gefasst werden – Stichwort Robotifizierung. Schließlich erreichen die hier spezifisch aufgeworfenen Fragestellungen in einer tiefergehenden Form ausnahmslos alle Lebensbereiche des Alltags, in denen autonome Maschinensysteme genutzt werden. Auch hier gilt es, Bedingungen zu analysieren und Konsequenzen zu antizipieren.

Nicht zuletzt kann das automatisierte Fahren ganz neue Chancen eröffnen, aber auch negative Folgeerscheinungen mit sich bringen. Einer Reduzierung bzw. Verlagerung des Parkraumbedarfs in der Innenstadt und einer effizienteren Ausnutzung von Verkehrsflächen im fließenden Verkehr stünde durch die Kompensation von Standortnachteilen am Stadtrand eine neue Suburbanisierungswelle gegenüber.

Diese Publikation soll im Sinne unseres Stiftungszwecks zur Antizipation und Anregung künftiger Diskurse beitragen und so einen gesamtgesellschaftlichen Mehrwert erzielen. Das Buch soll Vertretern von Politik und Wirtschaft, Medien und Forschung sowie der interessierten Öffentlichkeit eine wissenschaftliche Grundlage an die Hand geben. Auf dieser Basis kann schließlich eine eigenständige und kompetente Auseinandersetzung mit den diversen Fragestellungen und Rahmenbedingungen des autonomen Fahrens erfolgen.

Prof. Dr. Eckard Minx
Vorsitzender des Vorstands

Prof. Dr. Rainer Dietrich
Mitglied des Vorstands

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	<i>Markus Maurer</i>	
2	Use-Cases des autonomen Fahrens	9
	<i>Walther Wachenfeld, Hermann Winner, Chris Gerdes, Barbara Lenz, Markus Maurer, Sven Beiker, Eva Fraedrich, Thomas Winkle</i>	
 Teil I Human and Machine		
<i>J. Christian Gerdes</i>		
3	Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext	41
	<i>Fabian Kröger</i>	
4	Why Ethics Matters for Autonomous Cars	69
	<i>Patrick Lin</i>	
5	Implementable Ethics for Autonomous Vehicles	87
	<i>J. Christian Gerdes, Sarah M. Thornton</i>	
6	Wechselwirkung Mensch und autonomer Agent	103
	<i>Ingo Wolf</i>	
7	Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern	127
	<i>Berthold Färber</i>	
 Teil II Mobilität		
<i>Barbara Lenz, Eva Fraedrich</i>		
8	Autonomous Driving – Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions	151
	<i>Miranda A. Schreurs, Sibyl D. Steuwer</i>	

9	Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung	175
	<i>Barbara Lenz, Eva Fraedrich</i>	
10	Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge	197
	<i>Sven Beiker</i>	
11	Autonomes Fahren und Stadtstruktur	219
	<i>Dirk Heinrichs</i>	
12	Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung	241
	<i>Rita Cyganski</i>	
13	Auswirkungen des autonomen Fahrens auf das Fahrzeugkonzept	265
	<i>Hermann Winner, Walther Wachenfeld</i>	
14	Implementierung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems	287
	<i>Sven Beiker</i>	

Teil III Verkehr

Bernhard Friedrich

15	Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen	313
	<i>Peter Wagner</i>	
16	Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge	331
	<i>Bernhard Friedrich</i>	
17	Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: Erkenntnisse aus der Unfallforschung	351
	<i>Thomas Winkle</i>	
18	Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes	377
	<i>Heike Flämig</i>	
19	Autonomous Mobility-on-Demand Systems for Future Urban Mobility	399
	<i>Marco Pavone</i>	

Teil IV Sicherheit

Hermann Winner, Markus Maurer

20	Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren	419
	<i>Klaus Dietmayer</i>	

21 Die Freigabe des autonomen Fahrens	439
<i>Walther Wachenfeld, Hermann Winner</i>	
22 Lernen autonome Fahrzeuge?	465
<i>Walther Wachenfeld, Hermann Winner</i>	
23 Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge	489
<i>Andreas Reschka</i>	
24 Erhebung und Nutzbarmachung zusätzlicher Daten – Möglichkeiten und Risiken	515
<i>Kai Rannenberg</i>	

Teil V Recht und Haftung

Tom Michael Gasser

25 Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge . . .	543
<i>Tom Michael Gasser</i>	
26 Product Liability Issues in the U.S. and Associated Risk Management . .	575
<i>Stephen S. Wu</i>	
27 Regulation and the Risk of Inaction	593
<i>Bryant Walker Smith</i>	
28 Entwicklungs- und Freigabeprozess automatisierter Fahrzeuge: Berücksichtigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Risiken . .	611
<i>Thomas Winkle</i>	

Teil VI Akzeptanz

Barbara Lenz, Eva Fraedrich

29 Gesellschaftliche und individuelle Akzeptanz des autonomen Fahrens . .	639
<i>Eva Fraedrich, Barbara Lenz</i>	
30 Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren – Analyse, Einordnung und Bewertung	661
<i>Armin Grunwald</i>	
31 Vom (Mit-)Fahren: autonomes Fahren und Autonutzung	687
<i>Eva Fraedrich, Barbara Lenz</i>	
32 Marktauswirkungen des automatisierten Fahrens	709
<i>David M. Woisetschlager</i>	

Mitarbeiterverzeichnis

Sven A. Beiker, Dr.-Ing. formerly Stanford University, Center for Automotive Research at Stanford, Palo Alto, CA 94304, USA

Rita Cyganski, Dipl.-Geogr. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung, 12489 Berlin, Deutschland

Klaus Dietmayer, Prof. Dr.-Ing. Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikro-technik, 89081 Ulm, Deutschland

Berthold Färber, Prof. Dr. Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, Deutschland

Heike Flämig, Prof. Dr.-Ing. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Verkehrsplanung und Logistik, 21071 Hamburg, Deutschland

Eva Fraedrich, M.A. Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, 10099 Berlin, Deutschland

Bernhard Friedrich, Prof. Dr.-Ing. Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, 38092 Braunschweig, Deutschland

Tom Michael Gasser, Ass. Jur. Bundesanstalt für Straßenwesen, 51427 Bergisch Gladbach, Deutschland

J. Christian Gerdes, Prof. Dr. Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering Center for Automotive Research at Stanford, Stanford CA 94305, USA

Armin Grunwald, Prof. Dr. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut für Technologie – KIT – Campus Nord, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

Dirk Heinrichs, Prof. Dr.-Ing. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung, 12489 Berlin, Deutschland

Fabian Kröger, M.A. CNRS, ENS, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Institut d'histoire moderne et contemporaine (IHMC), Equipe d'histoire des techniques, 75004 Paris, Frankreich

Barbara Lenz, Prof. Dr. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrsforschung, 12489 Berlin, Deutschland

Patrick Lin, Dr. Morro Bay, California Polytechnic State University, Philosophy Department, California 93442, USA

Markus Maurer, Prof. Dr.-Ing. TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Deutschland

Marco Pavone, Prof. Dr. Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford CA 94305-4035, USA

Kai Rannenberg, Prof. Dr. Goethe-Universität Frankfurt, Deutsche Telekom Chair of Mobile Business and Multilateral Security, 60629 Frankfurt am Main, Deutschland

Andreas Reschka, M.Sc. Technische Universität Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, 38106 Braunschweig, Deutschland

Miranda Schreurs, Prof. Dr. Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik, 14195 Berlin, Deutschland

Bryant Walker Smith, Prof. Dr. J.D., LL.M. University of South Carolina, School of Law, Columbia, SC 29208, USA

Sibyl D. Steuwer, Dr. Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik, 14195 Berlin, Deutschland

Sarah M. Thornton, M.Sc. Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering, Center for Automotive Research at Stanford, Stanford CA 94305, USA

Walther Wachenfeld, Dipl.-Ing. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, 64287 Darmstadt, Deutschland

Peter Wagner, Prof. Dr. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, 12489 Berlin, Deutschland

Thomas Winkle, Dipl.-Ing. MBA Technische Universität München – TUM, Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, 85747 Garching, Deutschland

Hermann Winner, Prof. Dr. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, 64287 Darmstadt, Deutschland

David Woisetschläger, Prof. Dr. TU Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, 38106 Braunschweig, Deutschland

Ingo Wolf, Dipl.-Psych. Freie Universität Berlin, Institut Futur, 14195 Berlin, Deutschland

Stephen S. Wu, Esq., J.D. Los Altos, CA 94022, USA

Markus Maurer

Inhaltsverzeichnis

1.1 Was ist autonomes Fahren? 2

1.2 Autonomes Fahren – Motivatoren in der Forschung 4

1.3 Gliederung des Buches 5

1.4 Arbeit im Projekt 6

Literatur 8

Autonomes Fahren wird heute in den Medien engagiert, gelegentlich auch sehr emotional diskutiert. Die Debatte wird angeheizt durch Erfolgsmeldungen von Automobilherstellern, Systempartnern und Unternehmen, deren Geschäftsmodelle bislang in anderen Bereichen liegen. Noch im Jahr 2011, in der Definitionsphase des Projektes „Autonomes Fahren – Villa Ladenburg“, das auch das vorliegende Buch ermöglicht hat, war nicht abzusehen, wie präsent das Thema in der öffentlichen Diskussion zu Projektende drei Jahre später sein würde.

Gemäß der Zielsetzung der Daimler und Benz Stiftung will das Projekt die Diskussion zu einem technischen Thema mit großer gesellschaftlicher Bedeutung anregen. Es wäre unbescheiden und sachlich falsch, die wachsende Diskussion auf das Konto dieses Förderprojektes zu verbuchen, wo doch gleichzeitig mehrere weltweit führende Konzerne sich mit ihren Forschungs- und Öffentlichkeitsabteilungen in einem für sie zukunftsweisenden Technologiefeld zu positionieren versuchen. Allerdings hat die öffentliche Diskussion

M. Maurer (✉)
TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Deutschland
maurer@ifr.ing.tu-bs.de

entscheidende Impulse durch das Förderprojekt erhalten, auch wenn der Zusammenhang nicht immer auf Anhieb erkennbar wurde.

Unbestritten hat die Daimler und Benz Stiftung hervorragendes Gespür bewiesen und zur rechten Zeit dieses Projekt angestoßen: Gerade weil autonomes Fahren derzeit so viel Aufmerksamkeit erfährt, erscheint es den Herausgeberinnen und Herausgebern dieses Buches ein gut gewählter Zeitpunkt, einen möglichst ganzheitlichen Blick auf das Thema zu wagen. Für diese Diskussion haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedenster Disziplinen die Aufgabe angenommen, ihre Sicht auf das autonome Fahren verständlich für den Kreis der interessierten Öffentlichkeit zu formulieren und dadurch viele relevante Aspekte in die Diskussion einzubringen.

Als Wissenschaftler bewegen wir uns dabei auf ungewohntem Terrain: Wir sprechen gleichermaßen das Fachpublikum, potenzielle Stakeholder und die interessierte Öffentlichkeit an. Natürlich kann dieses Buch nicht alle Wünsche befriedigen. Zur vertiefenden Lektüre sei daher bereits an dieser Stelle auf die ebenfalls entstehenden Fachartikel der Projektbeteiligten in den einschlägigen Zeitschriften und Konferenzbänden ihrer jeweiligen Fachbereiche verwiesen. Auch wird die Stiftung begleitend zu diesem Band Publikationen fördern, die die Kernthesen des Buches noch stärker zusammenfassen und in Alltagssprache übersetzen.

1.1 Was ist autonomes Fahren?

Bereits der oberflächliche Blick auf die aktuelle öffentliche Debatte des autonomen Fahrens zeigt, dass es kein einheitliches Begriffsverständnis gibt. Um eine gewisse Konvergenz im Begriffsverständnis zum autonomen Fahren unter den Akteuren im Projekt zu erzeugen, wurden zu Beginn des Projektes sehr subjektiv ausgewählte Definitionen angeboten. Veranschaulicht wurden diese Definitionen durch detailliert beschriebene Anwendungsfälle (s. Kap. 2). Bei aller Subjektivität seien auch diese Definitionen hier dokumentiert.

Seit Jahrzehnten kursiert unter den Pionieren im Bereich des autonomen Fahrens ein Wortspiel mit dem Wort Automobil: Bei der Erfindung des Autos wurde durch die Begriffsbildung „Automobil“ mit dem griechischen *autòs* („selbst, persönlich, eigen“) und dem lateinischen *mobilis* („beweglich“) [1] das „Selbstbewegliche“ betont. Es überwog die Freude daran, dass der Fahrer ohne Unterstützung von Pferden mobil wird. Nicht gewürdigt wurde in dieser Begriffsbildung, dass beim Automobil durch die fehlenden Pferde auch eine gewisse Form von Autonomie des Gefährts verloren ging. Durch Training und Dressur hatten die Kutschpferde gelernt, sich in Grenzen selbst (griech. *autòs*, s. o.) an einfache Gesetze (griech. *nómos*: „menschliche Ordnung, von Menschen gesetztes Recht“) zu halten. In diesem Sinne hatten sie und damit das Gespann eine gewisse Autonomie erlangt.

Beim Übergang von der Pferdekutsche zum Automobil gingen wichtige Fähigkeiten zur Hindernisvermeidung und gelegentlich wohl auch zu „autonomen Missionen“ verloren. Manches Mal werden die Pferde einen Kutscher sicher nach Hause gebracht haben, auch wenn er nicht mehr voll fahrtauglich war, oder sie überführten zumindest das Fuhrwerk

in einen „sicheren Zustand“, indem sie sich am Gras des Wegesrandes gütlich taten. Das autonome Automobil will dem Fahrzeug seine verloren gegangene Autonomie zurückgeben, ja die historische Form noch weit übertreffen.

Wichtig für das Verständnis des „autonomen Fahrens“ im Projekt wurde eine spezielle Perzeption des Begriffs Autonomie bei Kant, wie sie Feil formuliert: Autonomie als „Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten)-Gesetzes“ [2]. Im Fall des autonomen Fahrzeugs gibt der Mensch dieses Sitten-Gesetz vor, indem er das Verhalten des Fahrzeugs programmiert: Immer wieder muss das Fahrzeug im Verkehr Verhaltensentscheidungen treffen – bzw. werden Entscheidungen ausgeführt, die zuvor von Menschen für alle erdenklichen Fälle programmiert wurden.

Es soll nicht verschwiegen werden, dass die Reaktion von Expertinnen und Experten unterschiedlichster Fachdisziplinen von völliger Ablehnung dieser Definition bis hin zu abgewogener Zustimmung reichte und reicht. Unabhängig davon war es aber mit dem Verweis auf den so verstandenen und interpretierten Kantschen Autonomie-Begriff möglich geworden, die unmittelbare Verknüpfung von technischer Entwicklung und ethischen Überlegungen aufzuzeigen.

Die Bedeutung dieser Definition für Techniker zeigt sich nach meiner Erfahrung deutlich im Dialog mit Studierenden: Konfrontiert mit dieser Definition konnten Studierende der Ingenieurwissenschaften in Braunschweig und München bereits in den letzten zehn Jahren erkennen, dass sie bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge nicht nur Technik erforschen und entwickeln sollen, sondern in aller Konsequenz auch „Sittengesetze“ implementieren werden: Wie verhält sich ein autonomes Fahrzeug in einer Dilemma-Situation, wenn bei einem Unfall unvermeidlich der eine oder andere Verkehrsteilnehmer zumindest verletzt wird? Diese Diskussion wird in diesem Buch von Patrick Lin und Chris Gerdes vertieft (s. Kap. 4 und Kap. 5).

Zur Verständigung von Technikern und Juristen wurden in einer von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geleiteten Arbeitsgruppe unterschiedliche Assistenz- und Automatisierungsgrade definiert [3]. Der höchste definierte Automatisierungsgrad wird dort „vollautomatisiert“ genannt: Das vollautomatisierte Fahrzeug fährt selbst ohne menschliche Überwachung. Bei Degradation der Leistungsfähigkeit des Systems wird das Fahrzeug selbstständig „in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt“. Aus technischer Sicht besteht die besondere Herausforderung darin, dass kein menschlicher Überwacher zur Verfügung steht, der Systemgrenzen oder Systemfehler erkennt und bei Bedarf das Fahrzeug in den sicheren Zustand überführt. Das vollautomatisierte Fahrzeug muss selbstständig seinen eigenen Zustand überwachen, mögliche Systemfehler und Degradationen der Leistungsfähigkeit rechtzeitig erkennen und dann – bei drohendem Leistungsabfall – den Übergang in einen sicheren Zustand einleiten und durchführen. Offensichtlich nimmt der sichere Zustand eine zentrale Rolle in der Definition ein: Worin besteht aber der sichere Zustand, wenn sich ein Fahrzeug vollautomatisiert mit 130 Stundenkilometern über die Autobahn bewegt?

Pointiert folgert Ohl [5], dass die in den letzten Jahrzehnten von Forschungsinstituten, Fahrzeugherstellern und IT-Konzernen gezeigten Prototypen für autonome Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr im Sinne der Definitionen der BASt nur teilautomatisiert

unterwegs waren und sind. Sicherheitsfahrer überwachen das automatisierte Fahrzeug; damit bleibt der technische Nachweis für die Serienreife des Sicherheitskonzeptes letztendlich aus. Im Sinne der Definition für vollautomatisiertes Fahren fehlt damit bis heute der Machbarkeitsnachweis für Fahrten auf öffentlichen Straßen, selbst wenn der Sicherheitsfahrer bei mancher Fahrt nicht eingreifen musste.

Bei aller Expertenkritik am Begriff seien autonome Fahrzeuge in diesem Buch durch ihre „Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten)-Gesetzes“ (Kant, nach [2], s. o.) gekennzeichnet, das der Mensch vorgibt; im Sinne der Definitionen der BAST sind sie vollautomatisierte Fahrzeuge [3].

Aus Platzgründen sei in diesem Buch auf eine vollständige Dokumentation des Standes der Forschung und der Technik und auf eine Schilderung der Forschungshistorie verzichtet. In Bezug auf autonome Straßenfahrzeuge haben Matthaei et al. [4] den aktuellen Stand der Technik zusammengetragen. Fabian Kröger gibt in Kap. 3 einen eindrucksvollen Überblick über autonomes Fahren als Vision oder Science-Fiction in der Geschichte vor allem der bildgebenden Medien.

1.2 Autonomes Fahren – Motivatoren in der Forschung

In der Vergangenheit und auch heute wird die Forschung an vollautomatisierten Fahrzeugen [3] aus einer Vielzahl von Gründen betrieben. Hier seien nur die meistgenannten erwähnt.

Auch wenn in Deutschland die Zahl der Unfalltoten beinahe jährlich sinkt, so sind doch die weltweit geschätzten Zahlen Anlass genug für eine weitere Erhöhung der Sicherheit des Verkehrssystems. Laut WHO starben 2010 weltweit 1,24 Millionen Menschen durch Verkehrsunfälle [7]. Thomas Winkle beschäftigt sich in Kap. 17 mit der Frage, unter welchen Voraussetzungen sich die unfallvermeidende Wirkung von automatisierten Fahrzeugen bereits vor der Markteinführung eines Systems prognostizieren lässt.

Im Mittelpunkt des jeweiligen Fahrzeugsystems sollte der Assistenzbedarf der FahrerIn/des Fahrers oder der potenziellen NutzerIn/des potenziellen Nutzers stehen. Ist sie oder er mit Tätigkeiten konfrontiert, die ermüden und keinen Fahrspaß generieren (Stop-and-go-Verkehr, lange Autobahnstrecken)? Oder ist sie oder er temporär nicht fahrtauglich, beispielsweise unter dem Einfluss von Medikamenten oder durch Müdigkeit, oder schlicht zu unaufmerksam für aktives Fahren? Besteht Assistenzbedarf, weil die Sinne alters- oder krankheitsbedingt nachlassen, die Muskulatur oder das Skelett erkranken? Dann eröffnen autonome Fahrfähigkeiten des Autos neue Chancen für die individuelle Mobilität.

Vollautomatisiertes Fahren [3] bietet große Potenziale bei der Optimierung des Verkehrsflusses. Bereits das wohl bekannteste europäische Programm zur Fahrzeugautomatisierung des vergangenen Jahrhunderts wies auf dieses Ziel hin: „**Programme for a European traffic with highest efficiency and unprecedented safety**“ (1987–1994), kurz „Prometheus“ [6]. Jüngere Projekte zeigen technische Lösungen auf, die speziell der Erhöhung des Verkehrsflusses dienen. In Kap. 15, Kap. 16 und Kap. 19 befassen sich die Autoren mit den

Potenzialen von autonomen Fahrzeugen in Hinblick auf den Verkehrsfluss und neue Nutzungskonzepte für Fahrzeuge.

Besondere Beachtung verdient die Bedeutung autonomer Fahrfähigkeiten für Nutzfahrzeuge. Heike Flämig untersucht, welche Möglichkeiten sich für autonome Fahrzeuge im Bereich des Güterverkehrs ergeben (s. Kap. 18).

Bislang nicht im Fokus der Forschungsgemeinschaft stehen die Potenziale, die sich durch die Einführung autonomer Fahrzeuge für eine weitreichende Umgestaltung des Verkehrssystems, ja der Städte an sich ergeben. Die Autorinnen und Autoren der Teile „Mobilität“ und „Akzeptanz“ dieses Buches zeigen auf, wie vielschichtig die Veränderungen sein können, die durch die Einführung autonomer Fahrzeuge möglich werden. Diese potenziellen Veränderungen können Motivatoren, aber auch Hemmnisse für die Einführung sein.

1.3 Gliederung des Buches

Im Anschluss an diese Einleitung werden zunächst Use-Cases erläutert, die zum gemeinsamen Verständnis von autonomem Fahren bei den Autorinnen und Autoren beigetragen hatten und dies auch für die Leserschaft leisten sollen (s. o.). Darauf folgen sechs Teile, die jeweils von fachlich kompetenten Herausgeberinnen und Herausgebern betreut wurden. Aus deren Federn stammen auch die kurzen Einführungen, die jedem dieser Teile vorangestellt sind.

Den ersten Teil zum Thema „Mensch und Maschine“ eröffnet Fabian Kröger mit einer Zusammenfassung der öffentlichen, meist medialen Auseinandersetzung mit autonomen Straßenfahrzeugen seit dem Beginn erster Arbeiten zur Fahrzeugautomatisierung vor fast hundert Jahren. Chris Gerdes und Patrick Lin adressieren, wie autonomes Fahren unter ethischen Gesichtspunkten zu bewerten ist und ob sich autonome Fahrzeuge ethisch korrekt verhalten können. Berthold Färber und Ingo Wolf diskutieren Fragen des Miteinanders von Mensch und Maschine.

Im Teil „Mobilität“ wird untersucht, wie sich die Mobilität generell und in einzelnen Aspekten durch die Einführung autonomer Fahrzeuge verändern könnte. Dazu geben Miranda Schreurs und Sibyl Steuwer einen Überblick über die politischen Rahmenbedingungen. Barbara Lenz und Eva Fraedrich diskutieren die Potenziale für neue Mobilitätskonzepte, die sich durch autonomes Fahren ergeben könnten. Sven Beiker stellt unterschiedliche Einführungsszenarien für vollautomatisierte Fahrzeuge [3] vor; außerdem diskutiert er einen ganz konkreten Anwendungsfall. Dirk Heinrichs untersucht Konsequenzen und neue Fragestellungen für die Stadtentwicklung, die durch autonomes Fahren entstehen könnten. Hermann Winner und Walther Wachenfeld diskutieren die Auswirkungen, die autonomes Fahren auf das Fahrzeugkonzept an sich haben könnte. Rita Cyganski geht der Frage nach, wie autonome Fahrzeuge die Nachfrage nach Mobilität verändern können und wie sich dies in Modellen zur Verkehrsplanung abbilden ließe.

Im Teil „Verkehr“ prognostizieren Peter Wagner und Bernhard Friedrich, welche verkehrlichen Wirkungen autonome Fahrzeuge haben könnten. Thomas Winkle vertieft die

Diskussion um das Sicherheitspotenzial assistierter, teil- und vollautomatisierter Fahrzeuge [3]. Heike Flämig untersucht die besondere Bedeutung für den Gütertransport. Marco Pavone diskutiert das Potenzial von „Mobility-on-demand“.

Im Teil „Sicherheit“ werden grundlegende Fragen der technischen Zuverlässigkeit in der maschinellen Wahrnehmung (Klaus Dietmayer), der funktionalen Sicherheit (Andreas Reschka, Walther Wachenfeld, Hermann Winner) und der Datenintegrität (Kai Rannenberg) erörtert.

Im Teil „Recht und Haftung“ beschäftigen sich Tom Gasser, Stephen Wu und Bryant Walker Smith mit den geltenden Rechtsordnungen und rechtlichen Rahmenbedingungen für autonomes Fahren in Deutschland und den USA; Thomas Winkle empfiehlt die Einbeziehung von Expertenerfahrungen aus Haftungsfällen in den Entwicklungsprozess.

Im Teil „Akzeptanz“ gehen Eva Fraedrich und Barbara Lenz den Fragen zur individuellen und gesellschaftlichen Akzeptanz des automatisierten Fahrens nach. Armin Grunwald vertieft Fragen der gesellschaftlichen Risikoperzeption im Zusammenhang mit autonomem Fahren. Eva Fraedrich und Barbara Lenz untersuchen den Zusammenhang zwischen heutigen Praktiken der Autonutzung und Einstellungen zum autonomen Fahren. David Woissetschläger diskutiert ökonomische Konsequenzen für die klassische Automobilindustrie und neue Marktteilnehmer.

1.4 Arbeit im Projekt

Die Arbeitsweise im Projekt „Autonomes Fahren – Villa Ladenburg“ hat das vorliegende Buch beeinflusst. Daher sei sie hier kurz skizziert und transparent gemacht. „Motor“ des Projektes war das Kernteam bestehend aus Chris Gerdes, Barbara Lenz, Hermann Winner und Markus Maurer. Es konnte sich dabei auf die wissenschaftliche Mitarbeit von Eva Fraedrich, Walter Wachenfeld und Thomas Winkle stützen, denen an dieser Stelle herzlich gedankt sei. Im ersten Jahr der zweijährigen Projektlaufzeit – das Projekt dauerte insgesamt von Oktober 2012 bis September 2014 – wurden im Kernteam über 200 Fragen identifiziert, die relevant sind für das autonome Fahren. Diese Fragen waren die Basis für Lastenhefte, die den Autorinnen und Autoren dieses Buches als Leitfaden dienten. Drei Workshops wurden durchgeführt, um ein ähnliches Verständnis vom autonomen Fahren unter den Akteuren im Projekt zu erzeugen und die unterschiedlichen Perspektiven aus den verschiedenen Fachdisziplinen im Projekt bekannt zu machen: Auf einem ersten Workshop im November 2013 in Stuttgart-Möhringen wurde das Konzept des Projektes und das Grundverständnis vom autonomen Fahren – gegeben durch die oben diskutierten Definitionen und die Use-Cases (s. Kap. 2) – vorgestellt und erörtert. Auf zwei weiteren Workshops in Monterey (Februar 2014) und Walting (März 2014) präsentierten die Autorinnen und Autoren ihre Antworten auf die Lastenhefte und stellten sie damit allgemein im Projekt zur Diskussion. Der Disziplin, der Offenheit und der Expertise der Autorinnen und Autoren ist es zu verdanken, dass mit diesem Buch eine umfassende Diskussion über autonome Fahrzeuge vorgelegt werden kann, die gleichermaßen die gesellschaftlichen Potenziale und die Herausforderungen

auf dem Weg zur Serienreife adressiert. In diesem Sinne will dieses Buch Startpunkt für die nachhaltige Erforschung und Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge sein.

Ein besonders herzlicher Dank geht an alle Autorinnen und Autoren, die sich in diesem Buchprojekt zielorientiert, diszipliniert und immer offen für den interdisziplinären Dialog engagiert haben.

In der Schlussphase der Entstehung dieses Buches wurden die Autorinnen und Autoren von den Herausgeberinnen und Herausgebern der einzelnen Teile betreut, die dabei sehr engagiert die Konvergenz der Beiträge in den einzelnen Teilen unterstützten. Die Herausgabe der Teile gehörte zu den Aufgaben der Mitglieder des Kernteams. Ein besonderer Dank geht an Tom Gasser und Bernhard Friedrich, die jeweils die Herausgabe eines Teiles übernommen haben, obwohl sie nicht Mitglieder des Kernteams waren. Die entsprechende Fachkompetenz war im Kernteam nicht vorhanden.

Schon vor seinem Abschluss hat das Projekt die öffentliche wie auch die fachliche Diskussion zum autonomen Fahren in Deutschland und den USA erheblich beeinflusst. Als besonders positiv erwies sich, dass viele Akteure im Projekt seit Dezember 2013 auch am runden Tisch zum „automatisierten Fahren“ auf Initiative des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und seinen Arbeitsgruppen mitarbeiteten. Ergebnisse aus dem Projekt flossen und fließen daher in die Berichte des runden Tisches ein. Das Interesse der Fachwelt und der Öffentlichkeit wurde deutlich in der Resonanz auf die zahlreichen Vorträge, Pressegespräche und Veröffentlichungen, die im Projektkontext durchgeführt wurden. In den Projektzeitraum fallen auch erhebliche Korrekturen in der Kommunikation führender Fahrzeughersteller und Technologieunternehmen in Bezug auf das autonome Fahren. Es ist nicht auszuschließen, dass dieses Projekt hier schon erste sehr relevante Spuren hinterlassen hat.

Auch wenn es im Projekt selbst um autonomes Fahren im Sinne einer klaren, wissenschaftlich abgegrenzten Definition ging, wird ein Teil seiner Ergebnisse sicher unmittelbare Praxisrelevanz haben für hochautomatisierte Fahrzeuge und auch für Fahrerassistenzsysteme, die schon bald in Serienfahrzeugen auf die Straßen kommen werden.

Dieses Buch ist nur möglich geworden dank der Förderung durch die Daimler und Benz Stiftung, für die wir herzlich danken. „Wir“ sind in diesem Kontext alle Autorinnen, Autoren, Herausgeberinnen und Herausgeber dieses Buches. Wir danken auch für die gute Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag und die hochwertige Ausstattung der Druckausgabe. Dank der Förderung durch die Stiftung ist dieses Buch kostenlos elektronisch verfügbar. Ein besonderer Dank geht an verschiedene Mitarbeiter der Daimler AG für interessante Diskussionen, vor allem aber für das Verständnis, dass sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in diesem Projekt – unabhängig von Unternehmensinteressen – von wissenschaftlich motivierten Fragestellungen leiten ließen.

Mein ganz persönlicher Dank geht an Barbara, Chris und Hermann für die Bereitschaft, im Kernteam mitzuwirken, für die intensive Zusammenarbeit, für die Offenheit in den Diskussionen, für das ständige Streben, die eigene Erfahrung einzubringen, die eigenen Konzeptionen weiterzuentwickeln und das stete Ringen, gemeinsam zur nachhaltigen Erforschung und Entwicklung von autonomen Fahrzeugen beizutragen.

Literatur

1. Duden Deutsches Universalwörterbuch A–Z, Mannheim. Duden-Verlag (1989)
2. Feil, E.: Antithetik neuzeitlicher Vernunft – ‚Autonomie – Heteronomie‘ und ‚rational – irrational‘. 1. Auflage Göttingen Vandenhoeck & Ruprecht (1987)
3. Gasser, T., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach (2012)
4. Matthaei, R., Reschka, A., Rieken, J., Dierkes, F., Ulbrich, S., Winkle, T., Maurer, M.: Autonomes Fahren in: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg-Teubner-Verlag, 3. Auflage (2015)
5. Ohl, S.: Fusion von Umfeld wahrnehmenden Sensoren in städtischer Umgebung, Dissertation, TU Braunschweig (2014)
6. Nagel, H.-H.: EUREKA-Projekt PROMETHEUS und PRO-ART (1986–1994) in: Reuse, B., Vollmar, R.: Informatikforschung in Deutschland, Springer, 2008
7. WHO 2013: http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2013/road_safety_20130314/en/; abgerufen am 8.11.2014

Walther Wachenfeld, Hermann Winner, Chris Gerdes, Barbara Lenz,
Markus Maurer, Sven A. Beiker, Eva Fraedrich, Thomas Winkle

W. Wachenfeld (✉)

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
wachenfeld@fzd.tu-darmstadt.de

H. Winner

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
winner@fzd.tu-darmstadt.de

J.C. Gerdes

Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering Center for Automotive Research at Stanford,
USA

gerdes@stanford.edu/gerdes@cdr.stanford.edu

B. Lenz

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V, Institut für Verkehrsforschung, Deutschland
Barbara.Lenz@dlr.de

M. Maurer

TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Deutschland
maurer@ifr.ing.tu-bs.de

S. A. Beiker

formerly Stanford University, Center for Automotive Research at Stanford
sven@svenbeiker.com

E. Fraedrich

Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Deutschland
eva.fraedrich@geo.hu-berlin.de

T. Winkle

Technische Universität München – TUM, Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, Deutschland
winkle@carforensic.com

Inhaltsverzeichnis

2.1 Einleitung	10
2.2 Getroffene Annahmen	11
2.3 Beschreibung der Use-Cases	12
2.3.1 Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpiilot	12
2.3.2 Autonomes Valet-Parken	14
2.3.3 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer	17
2.3.4 Vehicle-on-Demand	19
2.4 Ausgewählte Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases	21
2.4.1 Merkmal A: Art des Beförderten	22
2.4.2 Merkmal B: Maximal zulässige Gesamtmasse	22
2.4.3 Merkmal C: Einsatzhöchstgeschwindigkeit	23
2.4.4 Merkmal D: Szenerie	24
2.4.5 Merkmal E: Dynamische Elemente	26
2.4.6 Merkmal F: Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen	27
2.4.7 Merkmal G: Verfügbarkeitskonzept	29
2.4.8 Merkmal H: Erweiterungskonzept	30
2.4.9 Merkmal I: Eingriffsmöglichkeiten	32
2.5 Grundlegende Definitionen	34
Literatur	37

2.1 Einleitung

Der Begriff des autonomen Fahrens wurde mithilfe der technischen Definition des Automatisierungsgrads „vollautomatisiert“ nach BSt [1] und zusätzlich durch das Verständnis der „Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten)-Gesetzes“ [2] in Kap. 1 beschrieben. Trotzdem kann innerhalb dieser Rahmendefinition eine Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten und Ausprägungen des autonomen Fahrens gefunden werden. Um diese Vielfalt der Möglichkeiten zu beherrschen, werden für die Varianten Stellvertreter gesucht. Einerseits bilden die Stellvertreter die Variationsbreite der Unterscheidungsmerkmale, die im Folgenden (Abschn. 2.4) definiert werden, ab. Andererseits stehen sie für typische Einsatzszenarien des autonomen Fahrens. Sie werden im Weiteren als Use-Cases des autonomen Fahrens bezeichnet. Um bei den Lesern und allen an dieser Diskussion Beteiligten ein gemeinsames Verständnis des autonomen Fahrens zu schaffen, werden ausgewählte Use-Cases benannt und zusätzlich durch Unterscheidungsmerkmale beschrieben. Ferner werden die vier abgeleiteten Use-Cases als Referenzbeispiele für weitere Betrachtungen innerhalb dieses Buches dienen, immer in dem Bewusstsein, dass eine Vielzahl weiterer Use-Cases existiert. Andere Use-Cases sollen damit sowohl für dieses Buch als auch für die Zukunft des autonomen Fahrens nicht ausgeschlossen werden.

Die in diesem Kapitel getroffenen Definitionen und Annahmen können zusätzlich für die unterschiedlichen Arbeitsbereiche durch detaillierte Beschreibungen erweitert werden, da jene für die verschiedenen Arbeitsbereiche in unterschiedlicher Weise relevant sind. Das Besitzverhältnis ist beispielsweise für eine technische Betrachtung weniger relevant als für eine Betrachtung der Marktauswirkungen. Deshalb sind Definitionen und Annahmen für den Einsatz in den unterschiedlichen Arbeitsbereichen kritisch zu prüfen.

Die Herleitung und Beschreibung der Use-Cases sind in drei Abschnitte unterteilt: Zunächst werden in Abschn. 2.2 Einschränkungen und Annahmen beschrieben, die übergeordnet für alle Use-Cases gelten. Anschließend folgt in Abschn. 2.3 die Beschreibung der vier ausgewählten Use-Cases hinsichtlich ihrer Merkmalsausprägungen. Zur weiteren Vertiefung für interessierte Leser werden in Abschn. 2.4 die eingesetzten Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases motiviert und erläutert. Zur Klärung von eventuellen Verständnisproblemen aufgrund unbekannter Begriffsdefinitionen werden die den Use-Cases zugrunde liegenden Begrifflichkeiten in Abschn. 2.5 erklärt. Dieser Aufbau wurde gewählt, um den Einstieg in die Use-Case-Beschreibung zu erleichtern; Unklarheiten in den ersten Abschnitten klären sich meist durch den Blick in Abschn. 2.5 (Grundlegende Definitionen) und Abschn. 2.4 (Ausgewählte Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases).

2.2 Getroffene Annahmen

Folgende Annahmen werden für alle vorgestellten Use-Cases gleichermaßen getroffen:

Mischbetrieb: Die Use-Cases werden zum Betrachtungszeitraum in einem Mischbetrieb aus Verkehrsmitteln mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden eingesetzt. Der Straßenverkehr besteht aus Fahrzeugen mit allen Automatisierungsgraden von „driver-only“ über „assistiert“ bis „vollautomatisiert“ (nach BASt [1]). Durch die stufenweise Einführung der Automatisierung ist eine menschliche Fahrzeugführung gleichzeitig zur Fahrzeugführung durch Fahrroboter wahrscheinlich.

Technisches Ausfallrisiko: Hardware-Ausfälle und Software-Fehler können auch bei autonom fahrenden Fahrzeugen auftreten. Allerdings wird davon ausgegangen, dass das nach aktuellem Stand der Technik (z. B. ISO 26262) entwickelte autonome Fahrzeug hinsichtlich der genannten Ausfälle mindestens so zuverlässig und sicher ist, wie es heutige konventionelle Fahrzeuge sind.

Detaillierungsgrad: Die Beschreibung der Use-Cases ist keine detaillierte Spezifikation. Statt einer detaillierten Beschreibung von Wetterbedingungen, Lichtverhältnissen, Fahrbahnbeschaffenheiten usw. wird vereinfachend angenommen, dass die Qualität sowie die Erfolgsquote, mit der ein Fahrroboter die Fahraufgabe ausführt, der menschlichen Qualität und Erfolgsquote ähnlich sind. Beispielsweise führt starker Regen erst dann zu einem Überführen in den sicheren Zustand und der Unterbrechung der Transportaufgabe, wenn auch der Fahrer die Fahrt unterbrechen würde. In diesem Kapitel bleibt unbeantwortet, ob diese Annahme aus Sicht der Nutzer, der Gesellschaft usw. ausreichend ist. Außerdem bleibt in diesem Kapitel offen, wie diese Qualität und Erfolgsquote quantifiziert und nachgewiesen werden könnte.

Gesetzeskonformität: Für alle Use-Cases wird angenommen, dass die autonome Fahrt konform zum Regelwerk des Rechtsraums (Nationalstaat, bundesstaatliche Ebene in den USA) durchgeführt wird, in dem die aktuelle Fahrt stattfindet. Aus dieser Annahme folgt direkt die Frage nach dem Handeln in Dilemma-Situationen: Ist es dem Fahrroboter erlaubt bzw. besitzt er die Möglichkeit, geltende Regeln zu missachten, um einen größeren Schaden zu vermeiden? Für die Use-Cases wird angenommen, dass es einen rechtsgültigen Satz von Regeln bzw. Metaregeln gibt, die der Fahrroboter beachtet. Dafür existiert eine Freigabe von jenem Staat zur Ausführung des autonomen Fahrens, wobei in diesem Kapitel offen gelassen wird, wie diese Freigabe zu erwerben ist und wie diese Regeln lauten.

2.3 Beschreibung der Use-Cases

Wie bereits erwähnt, stellen Use-Cases typische Einsatzszenarien autonomen Fahrens dar; sie sind Stellvertreter einer Variationsvielfalt von möglichen Ausprägungen autonomen Fahrens. Im Folgenden wurde die Anzahl auf vier Use-Cases reduziert, wobei die Existenz weiterer Stellvertreter hierdurch nicht ausgeschlossen wird. Diese vier Use-Cases lauten:

- Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpiilot
- Autonomes Valet-Parken
- Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer
- Vehicle-on-Demand

Bei der automatisierten Fahrt jeder dieser vier Use-Cases handelt es sich um die Automatisierung *Level 4 – vollautomatisiert* nach BASt [1]. Besonders die Aufteilung der Fahraufgabe zwischen Mensch und Fahrroboter, in der sich die vier Varianten voneinander unterscheiden, hat zur Auswahl dieser Use-Cases beigetragen. Die ersten zwei Use-Cases sind als Einstiegsvarianten des autonomen Fahrens denkbar, wohingegen die zwei letzten Use-Cases perspektivische Varianten darstellen.

2.3.1 Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpiilot

2.3.1.1 Nutzen

Der Fahrroboter übernimmt ausschließlich auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Schnellstraßen die Fahraufgabe (s. Abb. 2.1). Der Fahrer wird während der autonomen Fahrt zum Passagier und bekommt die Möglichkeit, seine Hände bzw. Füße vom Lenkrad bzw. von der Pedalerie zu nehmen und einer anderen Tätigkeit nachzugehen.

2.3.1.2 Beschreibung

Ab Autobahnbeginn bzw. der Auffahrt wird dem Fahrer die Möglichkeit geboten, den Fahrroboter zu aktivieren, wobei dies sinnvollerweise in Verbindung mit der Übergabe einer Zieladresse einhergeht. Der Fahrroboter übernimmt die Navigation, Bahnführung und

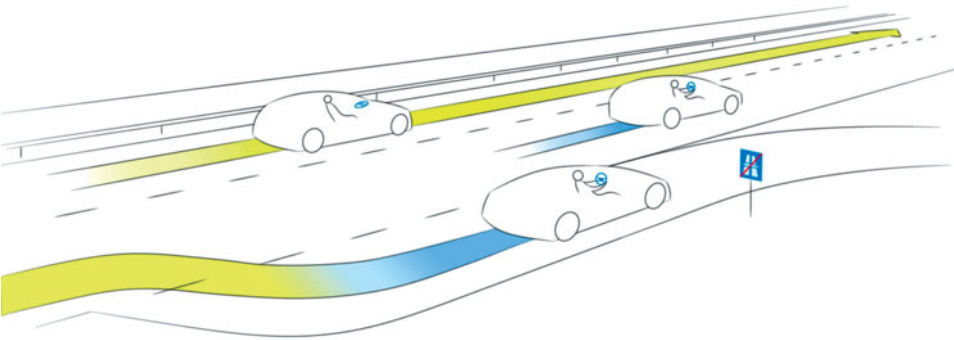


Abb. 2.1 Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnпилот

Regelung so lange, bis eine Autobahnausfahrt oder ein Autobahnende erreicht bzw. bis er vom Fahrer absichtlich entbunden wird. Die Übergabe an den Fahrer wird vom Fahrroboter sicher koordiniert. Erfüllt der Fahrer nicht die Anforderungen an die sichere Übergabe – z. B. weil er schläft oder ein fehlendes Situationsbewusstsein zeigt – überführt der Fahrroboter das Fahrzeug in den risikominimalen Zustand auf dem Seitenstreifen oder kurz außerhalb der Autobahn. Während der autonomen Fahrt ist kein Situationsbewusstsein vom Insassen gefordert, es gilt die Definition nach BAST [1] für die vollautomatisierte Fahrt. Besonders die Einschränkungen der Szenerie (z. B. durch das Fehlen von Lichtsignalanlagen) sowie der anzunehmenden dynamischen Objekte (z. B. im Normalfall keine Fußgänger) führen zu einer Vereinfachung, die aus dem Use-Case ein Einstiegsszenario machen könnten, auch wenn die hohe Einsatzgeschwindigkeit das Erreichen eines risikominimalen Zustands erheblich erschwert.

2.3.1.3 Merkmalsausprägungen

Tab. 2.1 Ausprägungen des Autobahnпилот

Merkmal		Ausprägung	
A	Art des Beförderten	3.	Person/-en mit abgestimmten Zielen
B	maximal zulässige Gesamtmasse	1-3.	500 kg bis 8 t
C	Einsatzhöchstgeschwindigkeit	4.	bis 120 km/h
D	Szenerie	8. a.	Autobahn ohne Freigabe erlaubt
E	dynamische Elemente	2.	nur Kraftfahrzeuge
F	Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen	1-4.	optimierte Navigation, optimierte Bahnführung, optimierte Regelung und Bereitstellen von Umweltinformationen
G	Verfügbarkeitskonzept	2.	Verfügbarkeitsfahrer
H	Erweiterungskonzept	2.	Fahrer
I	Eingriffsmöglichkeiten		siehe Abb. 2.2

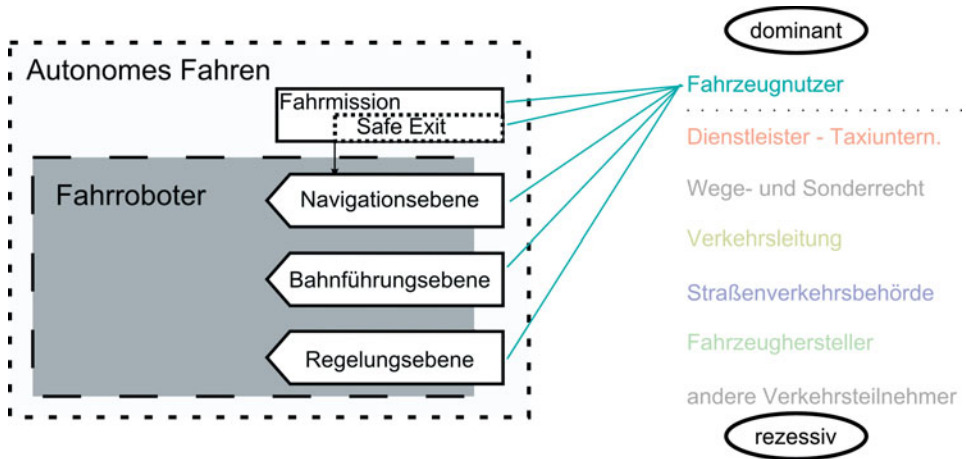


Abb. 2.2 Eingriffsmöglichkeiten beim Autobahnpilot

Abbildung 2.2 illustriert die Eingriffsmöglichkeiten der Instanzen auf die Ebenen der Fahraufgabe für den Use-Case Autobahnpilot. Der Fahrzeugnutzer bildet hierbei die einzige Instanz, die die Möglichkeit und Befugnis besitzt, einzugreifen. Dabei sei noch einmal hervorgehoben, dass die Übergabe durch den Fahrroboter sicher gestaltet wird. Eventuelle Dienstleister, Polizei und Krankenwagen mit Wegerecht, eine Verkehrsleitung usw. besitzen keine Möglichkeit, in die Fahrzeugführung einzugreifen. Eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Merkmale erfolgt in Abschn. 2.4.

2.3.2 Autonomes Valet-Parken

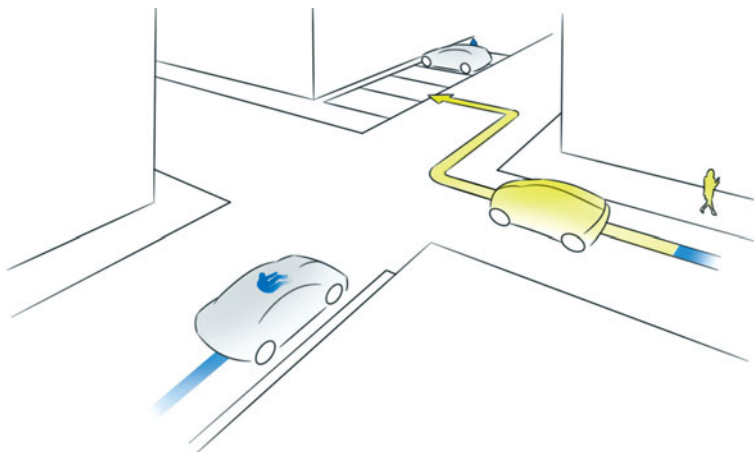


Abb. 2.3 Autonomes Valet-Parken

2.3.2.1 Nutzen

Der Fahrroboter stellt das Fahrzeug nach Verlassen der Passagiere und dem Ausladen von Transportgut in einer nahen oder auch entfernten Parkposition ab (s. Abb. 2.3). Der Fahrroboter fährt das Fahrzeug wieder von der Parkposition an eine Wunschadresse und besitzt die Möglichkeit und Berechtigung umzuparken. Der Fahrer spart die Zeit für die Parkplatzsuche, das Abstellen sowie die Fußwege eines entfernteren Parkplatzes. Außerdem wird der Zugang zum Fahrzeug erleichtert (räumlich wie zeitlich). Zusätzlich wird der Parkraum besser genutzt und die Parkplatzsuche effizienter gestaltet.

2.3.2.2 Beschreibung

Erreicht ein Fahrer sein Fahrtziel (z. B. Arbeitsplatz, Sportverein, Wohnung), stoppt dieser das Fahrzeug, steigt aus und gibt dem Fahrroboter den Befehl, das Fahrzeug abzustellen. Somit kann der Fahrroboter das Fahrzeug nun zu einem privaten Parkplatz, einem öffentlichen Abstellplatz oder einem Parkplatz des Dienstleisters wie z. B. einer Carsharing-Flotte bringen. Wichtig hierbei ist, dass dem Fahrroboter ein Parkareal zugewiesen wird, da der Parksuchverkehr durch den Fahrroboter für diesen Use-Case ausgeschlossen wird. Somit gibt es immer ein definiertes Ziel für den Fahrroboter. Ist das Fahrzeug abgestellt, ist das Umparken aufgrund der Anweisung einer autorisierten Parkplatzverwaltung möglich. Wird das Fahrzeug wieder benötigt, teilt ein autorisierter Nutzer des Fahrzeugs dem Fahrroboter eine Abholadresse mit. Der Fahrroboter fährt das Fahrzeug an diese Zieladresse und hält an, sodass der Fahrer einsteigen und die Fahraufgabe übernehmen kann.

Aufgrund der geringen Geschwindigkeit und der begrenzt befahrbaren Szenerie ist der Einsatzbereich des autonomen Valet-Parkens auf eine gewisse Umgebung um den Ort, an dem der Fahrer das Fahrzeug verlassen hat oder er seine Abholung wünscht, begrenzt. Auf der einen Seite reduzieren diese Randbedingungen die Anforderungen an die (Fahr-)Fähigkeiten des Fahrroboters erheblich, denn mit der geringen Geschwindigkeit ergibt sich eine geringere kinetische Energie sowie ein kürzerer Anhalteweg. Auf der anderen Seite könnten diese Randbedingungen dazu führen, dass das Fahrzeug als Verkehrsbehinderung und daher als lediglich begrenzt nützlich angesehen wird. Dieser Use-Case wird als Einstiegs-szenario betrachtet.

2.3.2.3 Merkmalsausprägung

Tab. 2.2 Ausprägungen des autonomen Valet-Parkens

Merkmal		Ausprägung		
A	Art des Beförderten	1.	kein Fördergut und keine Person	
B	maximal zulässige Gesamtmasse	1-3.	500 kg bis 8 t	
C	Einsatzhöchstgeschwindigkeit	2.	bis 30 km/h	
D	Szenerie	3. a. 4. a. 5. a.	Parkplatz bzw. Parkhaus, Erschließungsstraße, angebaute Hauptverkehrsstraße	ohne Freigabe erlaubt
E	dynamische Elemente	1.	ohne Ausschluss	
F	Informationsfluss zwischen Fahr- roboter und anderen Instanzen	1. & 3. & 6.	optimierte Navigation optimierte Regelung Fahrroboterüberwachung	
G	Verfügbarkeitskonzept	1.	keine Verfügbarkeitsergänzung	
H	Erweiterungskonzept	2.	Fahrer	
I	Eingriffsmöglichkeiten		siehe Abb. 2.4	

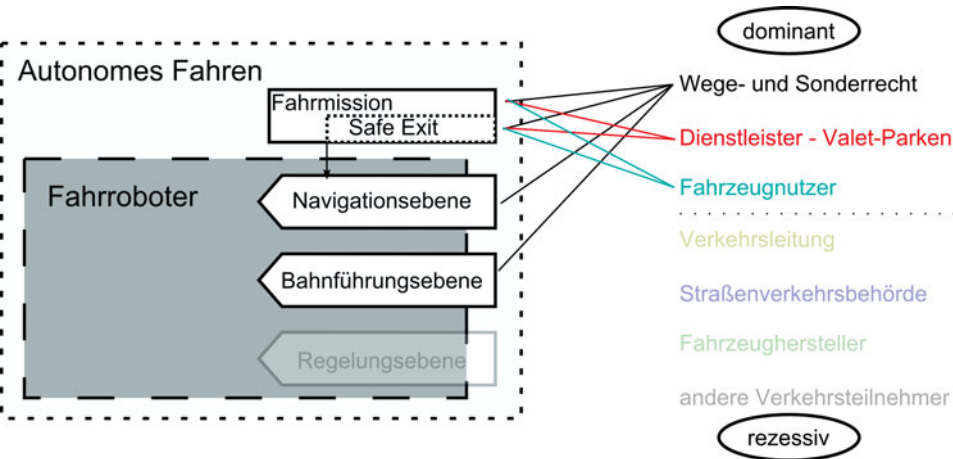


Abb. 2.4 Eingriffsmöglichkeiten beim autonomen Valet-Parken

Die Instanzen, die in die Fahraufgabe eingreifen können, sind in Abb. 2.4 auf der rechten Seite nach Rangordnung von oben (dominant) nach unten (rezessiv) aufgeführt. Der Fahrzeugnutzer besitzt die Möglichkeit, als externe Größe die Fahrmission zu ändern und dem Fahrroboter einen sogenannten Safe-Exit zu befehlen. Der Dienstleister überstimmt den Fahrzeugnutzer und kann ebenfalls auf die Fahrmission und den Safe-Exit einwirken. Beide Instanzen werden von den Instanzen mit Wege- und Sonderrecht (z. B. Polizei, Krankenwagen) überstimmt. Diese können auf Bahnführungsebene das Fahrzeug abbremsen, Navigation und Fahrmission ändern und einen Safe-Exit befehlen.

2.3.3 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

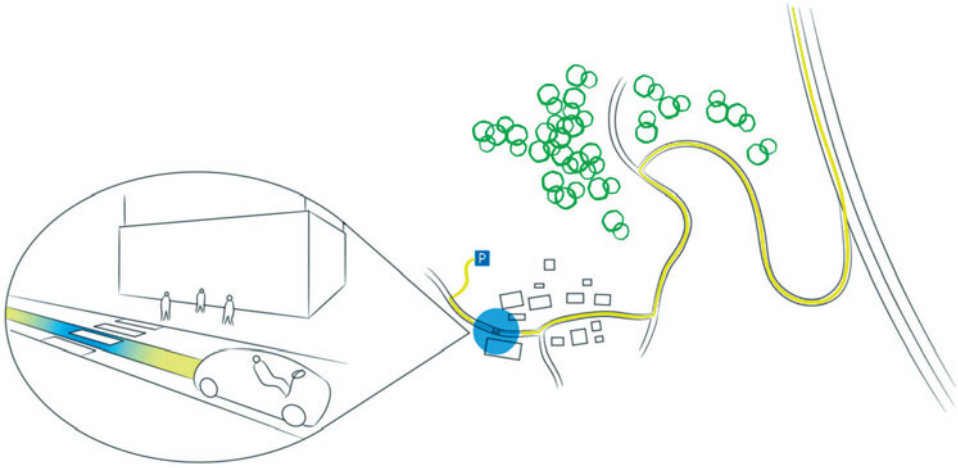


Abb. 2.5 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

2.3.3.1 Nutzen

Der Fahrer besitzt die Möglichkeit, in den freigegebenen Bereichen die Fahraufgabe an den Fahrroboter zu übergeben. Der Fahrer wird während der autonomen Fahrt zum Passagier und hat die Möglichkeit, seine Hände bzw. Füße vom Lenkrad bzw. von der Pedalerie zu nehmen sowie einer anderen Tätigkeit nachzugehen.

2.3.3.2 Beschreibung

Die Fahraufgabe kann vom Fahrer an den Fahrroboter übergeben werden, wenn die Szenerie, in der er sich befindet, für einen autonomen Fahrbetrieb freigegeben ist. Nahezu der gesamte Verkehrsbereich im zulassenden Land ist für das Fahrzeug freigegeben, jedoch steht diese Freigabe unter dem Vorbehalt einer Eingrenzung. Wenn beispielsweise die Straßenführung geändert oder ein neues Parkhaus eröffnet wird, so könnten diese Bereiche bis zur Freigabe kurzzeitig nicht autonom befahrbar sein. Auch erscheint es in diesem Szenario sinnvoll, dass Streckenabschnitte permanent oder temporär von der Freigabe ausgenommen sind, z. B. Strecken mit einer hohen Fußgängerüberquerfrequenz. Auch hier muss die Übergabe zwischen Fahrer und Fahrroboter in sicherer Weise geschehen.

Dieser Use-Case dürfte den heutigen Vorstellungen des autonomen Fahrens am nächsten kommen, da er stark mit der heutigen Pkw-Nutzung übereinstimmt. Zwar ist die Fahraufgabe nahezu vollständig an den Fahrroboter delegiert, jedoch begleitet der bisherige Hauptnutzer und Fahrzeugführer diese Fahrt weiterhin.

2.3.3.3 Merkmalsausprägung

Tab. 2.3 Ausprägungen des Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer

Merkmal		Ausprägung	
A	Art des Beförderten	3.	Person/-en mit abgestimmten Zielen
B	maximal zulässige Gesamtmasse	1-2.	500 kg bis 2 t
C	Einsatzhöchstgeschwindigkeit	5.	bis 240 km/h
D	Szenerie	2. b.- 8. b.	Wirtschaftsweg, Parkplatz bzw. Parkhaus, Erschließungsstraße, angebaute Hauptverkehrsstraße, anbaufreie Hauptverkehrsstraße, Landstraße, Autobahn
E	dynamische Elemente	1.	ohne Ausschluss
F	Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen	1-6.	optimierte Navigation, optimierte Bahnführung, optimierte Regelung, Bereitstellen von Umweltinformationen, Aktualisierung der Fahrroboterfähigkeit, Fahrroboterüberwachung
G	Verfügbarkeitskonzept	2.	Verfügbarkeitsfahrer
H	Erweiterungskonzept	2.	Fahrer
I	Eingriffsmöglichkeiten		siehe Abb. 2.6

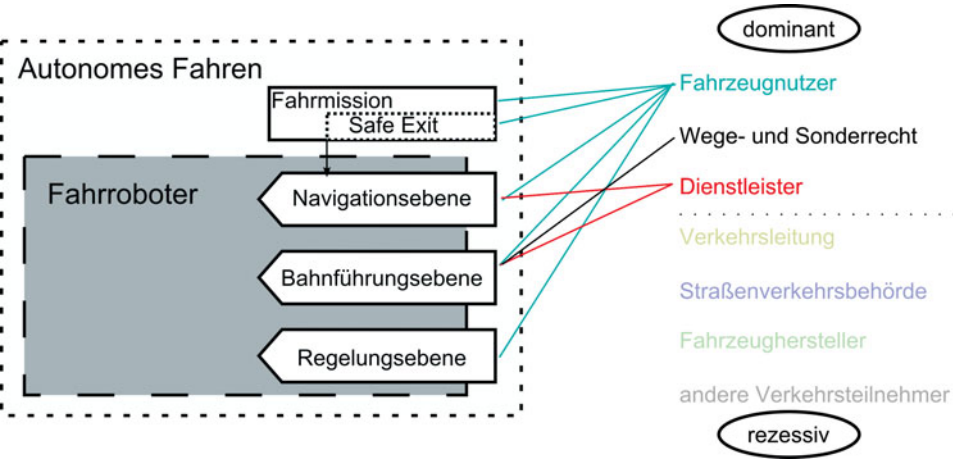


Abb. 2.6 Eingriffsmöglichkeiten beim Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer

In Abb. 2.6 wird dargestellt, welche Instanz (rechts) auf welche Ebene der Fahraufgabe (links) eingreifen kann. Der Fahrzeugnutzer kann, wenn gewünscht, nach sicherer Übergabe durch den Fahrroboter das Fahrzeug wie ein klassisches Driver-Only-Automobil

fahren. Des Weiteren existieren Schnittstellen für die Bahnführungsebene, Navigations-ebene und die Fahrmission, sodass der Fahrer auch auf diesen Ebenen Eingriffsmöglichkeiten besitzt. Der Fahrzeugnutzer dominiert die Instanzen mit Wege- und Sonderrecht. Polizei und Krankenwagen, die die Berechtigung besitzen, auf Bahnführungsebene einzugreifen, können somit vom Fahrzeugnutzer überstimmt werden. Entsprechendes gilt für einen Dienstleister: Der Dienstleister könnte auf Navigation und Bahnführung eingreifen, solange er nicht überstimmt wird. Für welche Dienste der Dienstleister diesen Zugriff benötigt, bleibt in diesem Kapitel unbeantwortet. Jedoch sind Konzepte denkbar, bei denen ein Dienstleister für Werbezwecke die Navigation übernimmt und dafür einen Teil der Kraftstoffkosten bzw. der Reisekosten trägt.

2.3.4 Vehicle-on-Demand

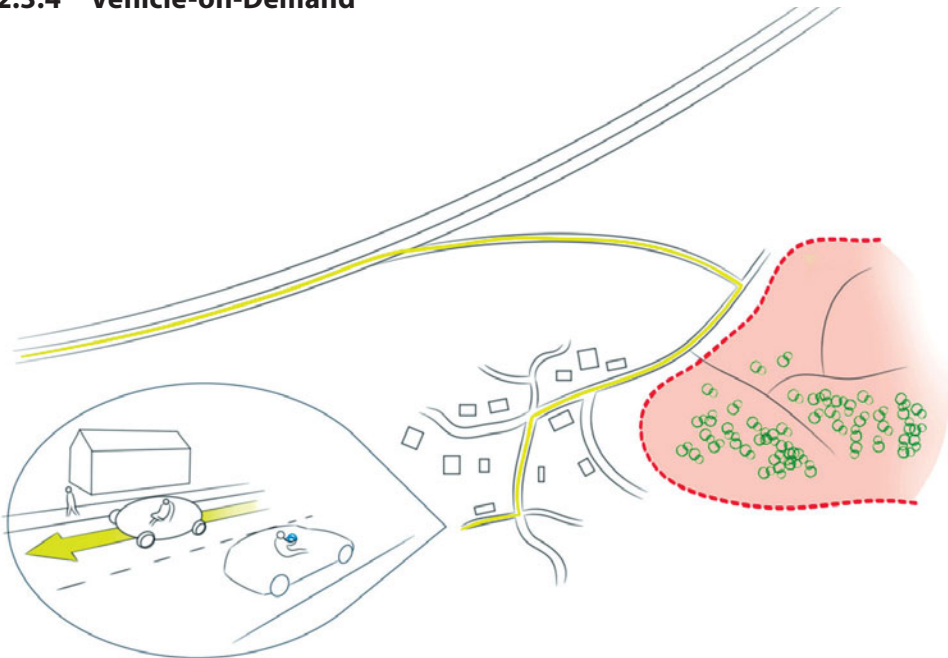


Abb. 2.7 Vehicle-on-Demand

2.3.4.1 Nutzen

Der Fahrroboter bewegt das Fahrzeug in allen Szenarien mit Insassen, mit Fördergut oder aber auch komplett ohne Ladeinhalt/Insassen autonom (s. Abb. 2.7). Passagiere nutzen die Fahrzeit komplett frei und für andere Dinge als die Bewältigung der Fahraufgabe. Der Innenraum ist hierbei völlig frei gestaltet. Transportgut kann ohne Pause nahezu 24 Stunden am Tag mithilfe des Fahrroboters transportiert werden, sofern dies durch die Fahrenergieversorgung nicht eingeschränkt wird.

2.3.4.2 Beschreibung

Der Fahrroboter bekommt von Insassen bzw. externen Größen (Nutzer, Dienstleister usw.) Fahrtziele mitgeteilt, zu denen er das Fahrzeug autonom befördert. Für den Menschen existiert keine Möglichkeit, die Fahraufgabe zu übernehmen. Er besitzt lediglich die Möglichkeit, das Fahrtziel zu bestimmen oder den Safe-Exit zu aktivieren. Verschiedene Geschäftsmodelle sind mit diesem Fahrroboter denkbar: Eine Mischung aus Taxi-Service und Carsharing, autonome Transportfahrzeuge oder sogar Nutzungsmodelle, die über die alleinige Transportaufgabe hinausgehen. Ein Beispiel hierfür ist ein Fahrzeug für soziale Netzwerke, das direkt Informationen aus dem Netzwerk nutzt, um Routen zu planen und Personen zusammenzubringen, oder das weitere Dienstleistungen anbietet, an die heute noch nicht gedacht wird.

2.3.4.3 Merkmalsausprägung

Tab. 2.4 Ausprägungen des Vehicle-on-Demand

Merkmal		Ausprägung	
A	Art des Beförderten	1-4.	kein Fördergut und keine Person, für Transport aufgegebenes Fördergut, Person/-en mit abgestimmten Zielen, Personen mit nicht abgestimmten Zielen
B	maximal zulässige Gesamtmasse	1-3.	von 500 kg bis 8 t
C	Einsatzhöchstgeschwindigkeit	4.	bis 120 km/h
D	Szenerie	2. a.- 8. a.	Wirtschaftsweg, Parkplatz bzw. Parkhaus, Erschließungsstraße, angebaute Hauptverkehrsstraße, anbaufreie Hauptverkehrsstraße, Landstraße, Autobahn
			ohne Freigabe erlaubt
E	dynamische Elemente	1.	ohne Ausschluss
F	Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen	1-8.	optimierte Navigation, optimierte Bahnführung, optimierte Regelung, Bereitstellen von Umweltinformationen, Fahrroboterüberwachung, Insassenüberwachung, Insassen Notruf
G	Verfügbarkeitskonzept	3.	teleoperiertes Fahren
H	Erweiterungskonzept	1.	keine Erweiterung
I	Eingriffsmöglichkeiten		siehe Abb. 2.8

Die Eingriffsmöglichkeiten auf den Use-Case Vehicle-on-Demand sind besonders aufgrund der weitreichenden (Fahr-)Fähigkeiten des Fahrroboters umfangreich: Die Regelungsebene wird dauerhaft durch den Fahrroboter ausgeführt. Die zwei Instanzen Verkehrsleitung sowie Wege- und Sonderrecht (Instanz mit größter Dominanz) können auf Navigations- und Bahnführungsebene eingreifen. Fahrzeugnutzer und Dienstleister besitzen

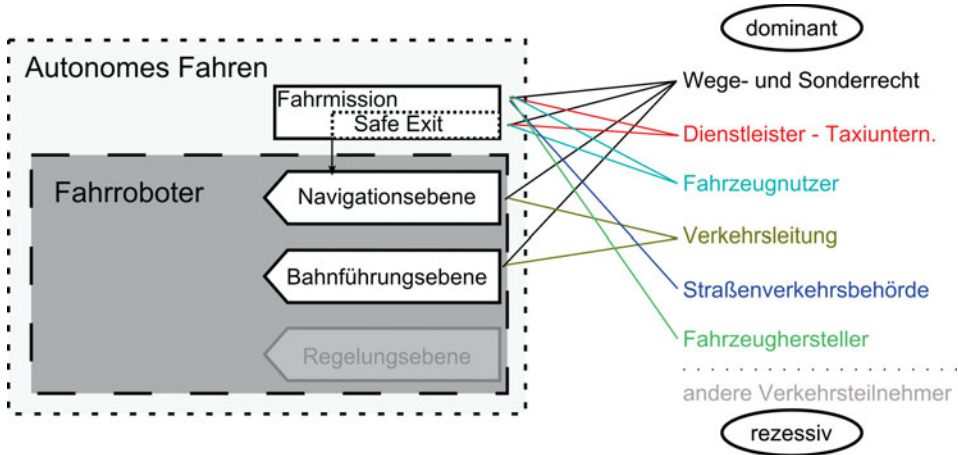


Abb. 2.8 Eingriffsmöglichkeiten beim Vehicle-on-Demand

Zugriff auf den Safe-Exit, sodass ein Insasse das Fahrzeug sicher und schnellstmöglich verlassen kann. Besonders hervorzuheben ist hier, dass der Fahrzeugnutzer vom Dienstleister und der Instanz mit Wege- und Sonderrecht überstimmt werden kann. Überstimmt eine der Instanzen den Nutzer, kann dieser auch den Safe-Exit nicht mehr bedienen und ist gezwungen, weiter im Fahrzeug zu bleiben. Diese Konstellation entspricht aktuellen Taxi-konzepten. Der Taxifahrer kann dem Wunsch eines Fahrgastes entsprechend und so schnell wie möglich anhalten. Prinzipiell hat er jedoch auch die Möglichkeit, diesen Wunsch zu missachten und das Fahrzeug nach eigenem Wunsch zu führen.

2.4 Ausgewählte Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases

In diesem Abschnitt werden Merkmale und deren mögliche Ausprägungen vorgestellt, mit denen die ausgewählten Use-Cases klassifiziert werden können. Neben den im Folgenden beschriebenen technisch orientierten Merkmalen können noch viele weitere Unterscheidungsmerkmale festgelegt werden, z. B. hinsichtlich Geschäftsmodell oder Marktplatzierung. Dieses soll auch aufgrund des bisher geringen Kenntnisstands über die konkreten Produkte zunächst hintangestellt werden.

Die Merkmale, in der alphabetischen Ordnung A bis I, wurden aus dem Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach Donges [3] abgeleitet und für die Beschreibung ausgewählt. Hierbei wird die Fahraufgabe in die Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung aufgeteilt.

2.4.1 Merkmal A: Art des Beförderten

2.4.1.1 Motivation

Für die individuelle Mobilität mit einem Fahrzeug ist heutzutage immer ein Mensch notwendig, der sich in dem Fahrzeug befindet und es dauernd bzw. unter allen Umständen beherrschen muss [6]. Diese Bedingung könnte sich durch die Automatisierung der Fahraufgabe ändern. Die Art des Beförderten stellt außerdem grundlegende Anforderungen an das Fahrzeugkonzept und an das Sicherheitskonzept eines Fahrzeugs.

2.4.1.2 Merkmalsausprägungen

1. *kein Fördergut und keine Person* (dadurch keine spezifischen Insassen- oder Transportschutzinteressen)
2. *für Transport aufgegebenes Fördergut*
3. *Person/-en mit abgestimmten Zielen* (Individualverkehr)
4. *Personen mit nicht abgestimmten Zielen* (öffentlicher Verkehr)

Ein Use-Case kann durch mehrere Ausprägungen dieses Merkmals abgedeckt werden. Die Aufteilung in Ausprägung 3 und 4 wird getroffen, um Individualverkehr und öffentlichen Verkehr zu unterscheiden. Ein Fahrzeug des Individualverkehrs befördert Personen mit abgestimmten Zielen. Im Gegensatz dazu befördert ein Fahrzeug des öffentlichen Verkehrs zusätzlich Personen, die nicht zuvor ihre Ziele abgestimmt haben. Mit dem öffentlichen Verkehr erreichen die unterschiedlichen Personen dennoch ihre Ziele, da ein Fahrplan mit Zielen und Zwischenzielen feststeht.

2.4.2 Merkmal B: Maximal zulässige Gesamtmasse

2.4.2.1 Motivation

Die maximal zulässige Gesamtmasse geht über die kinetische Energie in die Sicherheitsbetrachtung ein. Neben der Sicherheitsbetrachtung erweitert die Betrachtung der Gesamtmasse die Diskussion über den Individualverkehr bis hin zum öffentlichen Verkehr, den Gütertransport und die straßenbauliche Infrastruktur. Zusätzlich adressiert dieses Merkmal auf einer hohen Abstraktionsebene die Frage nach den Fahrzeugtypen, die möglicherweise durch die autonome Fahrfunktion und die sich ändernden Anforderungen nicht mit den aktuellen Fahrzeugtypen übereinstimmen werden. Statt auf die Grenzen der oft länderspezifischen Fahrzeugklassen einzugehen, werden vier Massenangaben gewählt, die von ultraleichten Fahrzeugen bis zu Schwerlastkraftwagen repräsentierenden Werten reichen und jeweils einen Faktor vier voneinander entfernt sind.

2.4.2.2 Merkmalsausprägungen

1. *ultraleichte Pkw um 500 kg*
2. *Pkw um 2 t*
3. *leichte Lkw und Transporter um 8 t*
4. *schwere Lkw um 32 t*

Eine diskrete Aufteilung wird eingesetzt, um die fiktiven Use-Cases zu beschreiben und ihre Masse ungefähr einzuordnen. Bei existierenden Use-Cases und definierten Einsatzbereichen ist die exakte Angabe einer Masse möglich.

2.4.3 Merkmal C: Einsatzhöchstgeschwindigkeit

2.4.3.1 Motivation

Das Merkmal der Einsatzhöchstgeschwindigkeit (genau genommen das Quadrat der Geschwindigkeit) bestimmt zusammen mit der Masse die maximale kinetische Energie und ist daher ebenfalls zu unterscheiden. Ferner berechnet sich der Bremsweg in den Stand über das Geschwindigkeitsquadrat. Entsprechend steigen die Anforderungen an das vollautomatisierte System für das vorausgesetzte Herbeiführen eines risikominimalen Zustandes im Fehlerfall oder an Funktionsgrenzen mit dem Geschwindigkeitsquadrat.

Neben der Sicherheitsbetrachtung sind die Reisezeit und folglich die bezogen auf den zeitlichen Aufwand noch vertretbare Reichweite als Ergebnis der Einsatzgeschwindigkeit eine die individuelle Mobilität beeinflussende Größe. Zusätzlich beschränkt die Einsatzhöchstgeschwindigkeit gegebenenfalls das Einsatzgebiet des Fahrzeugs, falls bauartbedingte Mindestgeschwindigkeiten auf bestimmten Straßentypen vorgeschrieben sind.

2.4.3.2 Merkmalsausprägungen

1. *bis 5 km/h*
2. *bis 30 km/h*
3. *bis 60 km/h*
4. *bis 120 km/h*
5. *bis 240 km/h*

Die Einsatzgeschwindigkeit wird in fünf Stufen unterteilt, wobei die erste Stufe Schrittgeschwindigkeit charakterisiert und die nachfolgenden sich jeweils um den Faktor zwei voneinander unterscheiden (=Faktor vier in Bezug auf kinetische Energie und Bremsweg). Eine diskrete Aufteilung wird eingesetzt, um die fiktiven Use-Cases zu beschreiben und ihre Einsatzhöchstgeschwindigkeit einzuordnen. Für konkrete Use-Cases ist ein Wert für die Einsatzhöchstgeschwindigkeit unabhängig von den fünf Stufen anzugeben.

2.4.4 Merkmal D: Szenerie

2.4.4.1 Motivation

Welche räumlichen Gebiete, die dem Fahrzeugführer durch das „Driver-only“-Automobil zugänglich sind, werden auch mit dem beschriebenen Use-Case des autonomen Fahrens befahrbar? Das Merkmal Szenerie beschreibt den räumlichen Einsatzbereich, in dem das Fahrzeug autonom fährt: Existieren beispielsweise genormte Strukturen, wie viele Fahrstreifen sind vorhanden und existieren sonstige Kennzeichnungen?

Bereits die statische Szenerie kann vielseitig sein und eine Herausforderung für den Fahrroboter darstellen. Ein Beispiel dafür sind die oft erwähnten, von Schnee bedeckten Fahrstreifen oder die von Büschen oder Bäumen verdeckten Verkehrszeichen. Diese bei Fahrtbeginn eventuell unbekannten und nicht beeinflussbaren Szenerie-Setups werden nicht bei diesem Merkmal beachtet. Inwiefern der Fahrroboter diese Szenerie-Setups bewältigen kann, ist durch die Annahme beschrieben, dass die Qualität und Erfolgsquote des Fahrroboters bei der Bewältigung der Fahraufgabe denen des menschlichen Fahrers entspricht.

Dieses Merkmal beschreibt folglich auf hoher Abstraktionsebene (Lage, Umfeld und Funktion der Straße) die vorhersehbaren und Regeln folgenden Szenerien.

2.4.4.2 Merkmalsausprägungen

Dimension: Art der Szenerie

1. *Gelände*
2. *Wirtschaftsweg*
3. *Parkplatz bzw. Parkhaus*
4. *Erschließungsstraße*
5. *angebaute Hauptverkehrsstraße*
6. *anbaufreie Hauptverkehrsstraße*
7. *Landstraße*
8. *Autobahn*
9. *Sonderareale*

Das Merkmal Szenerie besitzt in seiner ersten Dimension neun Ausprägungen, die aus der Erweiterung der Richtlinie für integrierte Netzgestaltung [7] hervorgehen. Die Beschreibung der einzelnen Ausprägungen findet sich in Tab. 2.5.

Dimension: Freigabe

Das Merkmal Szenerie besitzt neben der Ausprägung, innerhalb welcher Szenerie der Use-Case betrieben werden kann, eine zweite Dimension. Diese Dimension bedingt, ob die Szenerie explizit freigegeben werden muss oder nicht.

- a. *Ohne Freigabe erlaubt*: Alle Szenerien dieser Art sind für die autonome Fahrt geeignet, sodass sich der Fahrroboter in diesen Use-Cases frei bewegen kann.
- b. *Nur mit Freigabe erlaubt*: Nur ausgewählte und freigegebene Szenerien dieser Art erlauben dem Fahrroboter die autonome Fahrt in diesem Bereich.

Wer diese Freigabe ausführt, ob es ein privater oder staatlicher Dienst ist, wird zunächst offen gelassen. Ebenso wird zunächst die Art der Freigabe nicht weiter spezifiziert, beispielsweise könnte die Infrastruktur speziell gewartet oder eine Karte mit weiteren Informationen angereichert und bereitgestellt werden. Auch kann die Freigabe eine temporäre Komponente einbeziehen und statische oder dynamische Ausschlusszeiten für bestimmte Szeneriebereiche enthalten.

Tab. 2.5 Ausprägungen der Szenerie von Merkmal D

Ausprägung	Beschreibung
Gelände (offroad)	<ul style="list-style-type: none"> • keine genormten oder bekannten Strukturen, wie Fahrstreifen oder sonstige Kennzeichnungen • keine erkennbare Verkehrsregelung • nicht für das Befahren befestigt
Wirtschaftsweg	<ul style="list-style-type: none"> • Feldwege, Waldwege und Ähnliches • oft nur minimal befestigte Fahrbahn • öffentlich zugänglich • festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten
Parkplatz bzw. Parkhaus	<ul style="list-style-type: none"> • explizit für das Parken von Fahrzeugen ausgelegt und beschildert • nicht immer Fahrstreifenmarkierungen, sondern stattdessen genormte Markierung der Verkehrsfläche für das geordnete Abstellen der Fahrzeuge • im urbanen Raum: Parkhäuser mit mehreren Ebenen und teils schmale Auffahrtsrampen und wenig Rangierfreiraum • festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten
Erschließungsstraße	<ul style="list-style-type: none"> • angebaute Straßen innerhalb bebauter Gebiete, die im Wesentlichen der unmittelbaren Erschließung der angrenzenden bebauten Grundstücke oder dem Aufenthalt dienen • Anbindung (flächenhafte Erschließung) der durch Wohnen, Arbeiten und Versorgung geprägten Ortsteile • grundsätzlich einbahnig • untereinander mit plangleichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen verknüpft • Verknüpfung mit angebauten Hauptverkehrsstraßen durch plangleiche Knotenpunkte mit oder ohne Lichtsignalanlage oder Kreisverkehre • in besonderen Fällen für öffentlichen Personenverkehr • Aufnahme des wesentlichen Teils des innerörtlichen Radverkehrs • festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten
angebauter Hauptverkehrsstraße	<ul style="list-style-type: none"> • angebaute Straßen innerhalb bebauter Gebiete, die im Wesentlichen der Verbindung dienen bzw. den Verkehr aus Erschließungsstraßen sammeln • in der Regel Aufnahme von Linien des öffentlichen Personenverkehrs • z. T. Bestandteile zwischengemeindlicher Verbindungen (Ortsdurchfahrten) • einbahnig oder zweibahnig • Verknüpfung mit Straßen der gleichen Kategoriengruppe i. A. durch plangleiche Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage oder Kreisverkehren • z. T. durch Flächen des ruhenden Verkehrs geprägt • festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten

Tab. 2.5 (Fortsetzung)

Ausprägung	Beschreibung
anbaufreie Hauptverkehrsstraße	<ul style="list-style-type: none"> • anbaufreie Straßen im Vorfeld oder innerhalb bebauter Gebiete • Verbindungsfunktionen • Straßenseitenräume mit lockeren Bebauung und Einrichtungen der tertiären Nutzung¹, daher geringe Erschließungsfunktion • einbahnig oder zweibahnig • Verknüpfung mit dem übrigen Straßennetz überwiegend durch plangleiche Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage oder Kreisverkehren • festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten
Landstraße	<ul style="list-style-type: none"> • anbaufreie Straßen außerhalb bebauter Gebiete • einbahnig mit kurzen zweibahnigen Abschnitten • Verknüpfung mit Straßen der gleichen Kategoriengruppe i. A. durch plangleiche oder planfreie Knotenpunkte • im Wesentlichen Verbindungsfunktion • bei einzelnen unmittelbar an die Straße angrenzenden Gebäuden in geringem Maße Erschließungsfunktion • festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten
Autobahn	<ul style="list-style-type: none"> • anbaufreie Straßen außerhalb, im Vorfeld und innerhalb bebauter Gebiete • planfreie und teilplanfreie Knotenpunkte • zweibahnig • ausschließlich für schnellen Kraftfahrzeugverkehr • Zufahrt nur über spezielle Anschlussstellen • festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten
Sonderareale	<ul style="list-style-type: none"> • nicht öffentlich zugänglich • Geometrie ist nicht bekannt • beispielsweise um weiträumiges privates Gelände oder Industrieanlagen • evtl. zusätzliche Infrastruktur für autonomes Fahren (z. B. Containerhäfen mit autonomen Systemen für die Be- und Entladung sowie die Kommissionierung)

¹ d. h. Nutzung durch Handel und Gewerbe

2.4.5 Merkmal E: Dynamische Elemente

2.4.5.1 Motivation

Die Komplexität einer Szene hängt neben der Szenerie maßgeblich von den dynamischen Elementen ab. Die dynamischen Elemente, die sich zusätzlich zu dem autonom fahrenden Fahrzeug in der Szene befinden, erweitern die Anforderungen an die (Fahr-)Fähigkeiten des Fahrroboters. Somit beschreibt dieses Merkmal, inwieweit der Use-Case im aktuellen Straßenverkehr eingesetzt werden kann oder ob Einschränkungen bzw. der Ausschluss von dynamischen Elementen vorgesehen ist.

2.4.5.2 Merkmalsausprägungen

- 1. *ohne Ausschluss*
- 2. *nur Kraftfahrzeuge*
- 3. *nur autonom fahrende Fahrzeuge*
- 4. *keine anderen dynamischen Elemente*

Eine Beschreibung der einzelnen Ausprägungen findet sich in Tab. 2.6. Der Ausschluss anderer dynamischer Elemente bei den Ausprägungen 2 bis 4 ist nicht ohne Ausnahme gegeben, wie das folgende Beispiel illustriert: Die Szene auf einer heutigen Autobahn wird beispielsweise durch Ausprägung 2 *Nur Kraftfahrzeuge* beschrieben. Der Fall, dass eine Person oder ein Radfahrer die Autobahn betritt, ist trotzdem möglich, wird aber aufgrund seiner Eintrittswahrscheinlichkeit vernachlässigt. Gemäß der in Abschn. 2.2 (Getroffene Annahmen) genannten gemeinsamen Eigenschaften (Mischbetrieb) werden nur die Ausprägungen 1 und 2 für die Use-Case-Bildung verwendet.

Tab. 2.6 Ausprägungen des Merkmals E

Ausprägung	Beschreibung
ohne Ausschluss	<ul style="list-style-type: none">• komplexeste Szene• beinhaltet z. B. Tiere, Fußgänger, Radfahrer, Fahrzeuge, Polizeibeamte
nur Kraftfahrzeuge	<ul style="list-style-type: none">• Aufeinandertreffen von autonomen Fahrzeugen und menschgeführten Kraftfahrzeugen• Tiere, Fußgänger usw. nur als extrem seltene Ausnahme behandelt
nur autonom fahrende Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none">• exklusive Szenerie für sich autonom bewegendende Fahrzeuge
keine anderen dynamischen Elemente	<ul style="list-style-type: none">• exklusiv für ein (autonom fahrendes) Fahrzeug

2.4.6 Merkmal F: Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen

2.4.6.1 Motivation

Der Fahrroboter erfüllt die Aufgaben der Perzeption, Kognition, Verhaltensentscheidung und Verhaltensausführung: Dafür werden Informationen über den eigenen Zustand des vom Fahrroboter gesteuerten Fahrzeugs wie beispielsweise Position und Geschwindigkeit, aber auch Informationen über die Umwelt und die Insassen benötigt. Diese Informationen werden entweder durch Sensoren, durch Auslesen eines Speichers oder durch Kommunikation gewonnen. Wie und welche Informationen vom Fahrroboter mit welcher Instanz ausgetauscht werden, ist durch den Zweck des Informationsflusses definiert. Um den Informationsfluss für einen Use-Case zu beschreiben, werden den Use-Cases deshalb die Zwecke des Informationsaustausches zugeordnet.

Die Verfügbarkeit der Information muss der Übertragung sowie den Kommunikationspartnern und dem Einsatzzweck entsprechen. Wie bereits beschrieben, wird zusätzlich davon ausgegangen, dass die Technologie nur sukzessiv Einzug in den Markt hält; somit beherrschen nicht alle dynamischen Elemente in der Umgebung den Informationsaustausch. Der hier betrachtete Informationsfluss des Fahrroboters ist eine Untermenge des gesamten Informationsflusses des Fahrzeugs. Für die Betrachtung werden an dieser Stelle Zwecke, die zu Infotainment und Komfortsteigerung zu rechnen sind, vernachlässigt. Aktuelle Nachrichten, der Zugang zu einem sozialen Netzwerk oder Musikstreamingfunktionen können als Dienstleistungen den Zusatznutzen der autonomen Fahrt steigern, jedoch ist der Informationsfluss durch diese Dienste nicht primär für das autonome Fahren relevant. Deshalb werden nur Zwecke mit Einfluss auf die Verkehrssicherheit, Verkehrseffizienz sowie Zwecke, die eventuell für die autonome Fahrt vorausgesetzt werden, als Unterscheidungsmerkmal der Use-Cases beschrieben.

2.4.6.2 Merkmalsausprägungen

1. *Optimierung der Navigation*
2. *Optimierung der Bahnführung*
3. *Optimierung der Regelung*
4. *Bereitstellen von Umweltinformationen*
5. *Aktualisierung der Fahrroboterfähigkeit*
6. *Fahrroboterüberwachung*
7. *Insassenüberwachung*
8. *Insassennotruf*

Die zu den Ausprägungen gehörigen Beschreibungen sind in Tab. 2.7 gegeben.

Die ersten drei Ausprägungen besitzen zusätzlich das Potenzial, zu Interaktionen zu führen, die einer Verhandlung über die zeitliche und räumliche Nutzung von Verkehrsinfrastruktur entsprechen. Zunächst wird aber darauf verzichtet, diese Interaktionsmöglichkeit weiter zu betrachten.

Tab. 2.7 Ausprägungen des Merkmals F

Ausprägung	Beschreibung
Optimierung der Navigation	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch von für die Navigation relevanten Informationen wie Position, Fahrtziel, Witterung, Fließgeschwindigkeiten usw. mit überregionaler Verkehrszentrale (mehrere 100 km Einzugsgebiet) • Ziele der Optimierung: geringer Energieverbrauch, CO₂-Ausstoß, möglichst kurze Fahrtzeit/Fahrstrecke etc.
Optimierung der Bahnführung	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch von ausführlichen Informationen über Zustand (x, v, a, \dots) und Intention des durch den Fahrroboter bewegten Fahrzeugs sowie der Fahrzeuge in direkter Umgebung • Teilen von Informationen wie Witterung, Fahrbahnbeschaffenheit, Engstellen, Schaltzeiten von Lichtsignalanlagen (Ampeln) usw. mit einer lokalen Verkehrszentrale (wenige km Einzugsgebiet)

Tab. 2.7 (Fortsetzung)

Ausprägung	Beschreibung
Optimierung der Bahnführung	<ul style="list-style-type: none">• synchronisierte Fahrt (eine unter den benachbarten Fahrzeugen abgestimmte Fahrt) im Quer- sowie Längsverkehr (z. B. Kolonnenfahrt, verkehrsregelfreie Kreuzungen, sich anpassende Fahrstreifen etc.) als beispielhafte Zielsetzung
Optimierung der Regelung	<ul style="list-style-type: none">• Austausch von ausgewählten Fahrzeugzuständen sowie Intentionen des Fahrroboters, der Verkehrsteilnehmer und weiterer Elemente in direkter Fahrzeugumgebung• Ziel: Kollisionsvermeidung im Quer- und Längsverkehr mit einem oder mehreren Fahrzeugen der direkten Nachbarschaft entsprechend bereits existierender V2X-Konzepte
Bereitstellen von Umweltinformationen	<ul style="list-style-type: none">• Teilen von Informationen über die Fahrzeugumwelt, die vom Fahrroboter wahrgenommen wurden, mit den Verkehrsteilnehmern sowie einer Verkehrszentrale in direkter Umgebung• Ziel: Bedatung einer optimierten Karte als Informationsquelle für Positionierung, Gefahrenerkennung, Navigation etc.
Aktualisierung der Fahrroboterfähigkeit	<ul style="list-style-type: none">• Update des Herstellers, das die (Fahr-)Fähigkeiten des Fahrroboters verbessert
Fahrroboterüberwachung	<ul style="list-style-type: none">• Teilen von Informationen über den Zustand, die Fähigkeiten und die Intentionen des Fahrroboters mit berechtigten Instanzen• Ziel: Sicherung von Beweismaterial (Event Data Recording) für die Rekonstruktion eines Unfallhergangs und Mitteilung von Fehlfunktionen oder Gefahrensituationen durch Selbstdiagnose an den Hersteller
Insassenüberwachung	<ul style="list-style-type: none">• Teilen von Zustandsinformationen (Video, Audio, Herzschlag etc.) über den Beförderten mit einer Notrufzentrale oder einem Dienstleister• Weitergabe der Informationen an Berechtigte ohne Aktivität des Insassen• Ziel: Überwachung der Gesundheit und Sicherheit des Beförderten
Insassennotruf	<ul style="list-style-type: none">• aktive Kontaktierung von Notrufzentrale oder Dienstleister durch Insasse im Notfall• aktive Entscheidung des Insassen, ob er Informationen teilt oder nicht

2.4.7 Merkmal G: Verfügbarkeitskonzept

2.4.7.1 Motivation

Im Normalbetrieb wird das Fahrzeug durch den Fahrroboter innerhalb des zugelassenen Einsatzbereichs autonom bewegt. Erkennt der Fahrroboter eine i. A. nicht vorhersehbare Funktionsgrenze, übergibt der Fahrroboter an ein spezifiziertes Verfügbarkeitskonzept, welches festlegt, wie die Fahrmission fortgesetzt wird. Solche Funktionsgrenzen können beispielsweise durch unbekannte Hindernisse auf der Fahrbahn auftreten, die eine Weiterfahrt innerhalb der Entscheidungsautonomie nicht mehr zulassen. Ein Beispiel für ein solches Hindernis ist ein Ast, der so auf die Fahrbahn ragt, dass das Fahrzeug den Ast berühren muss, um die Fahrt fortzusetzen. In welchem Umfang das Verfügbarkeitskonzept

die komplette Fahraufgabe übernimmt oder dem Fahrroboter nur eine Entscheidung abnimmt, wird bewusst offen gelassen.

2.4.7.2 Merkmalsausprägungen

1. *keine Verfügbarkeitsergänzung*
2. *Verfügbarkeitsfahrer*
3. *teleoperiertes Fahren*
4. *Lotsen-Service*
5. *elektrisches Abschleppen*

In Tab. 2.8 werden die unterschiedlichen Verfügbarkeitskonzepte näher erläutert. Die Übergabe vom Fahrroboter auf das alternative Verfügbarkeitskonzept ist risikominimal umzusetzen. Der Fahrroboter überführt das Fahrzeug für die Übergabe in den risikominimalen Zustand, der für eine Übergabe an das jeweilige Verfügbarkeitskonzept geeignet ist. Die entsprechenden Schnittstellen für den Verfügbarkeitsfahrer, die Fernsteuerung, einen Lotsen oder das Abschleppen müssen zur Verfügung stehen.

Tab. 2.8 Ausprägungen des Merkmals G

Ausprägung	Beschreibung
keine Verfügbarkeits- ergänzung	Abwarten des Fahrroboters, bis durch äußere Einflüsse die Szene wieder beherrschbar und durch die Spezifikationen des Fahrroboters abgedeckt wird
Verfügbarkeitsfahrer	Unterstützung des Fahrroboters durch einen Insassen bei der Bewältigung der Szene (offen, ob durch Übernahme der Fahrfunktion oder durch Manöverkommandos)
teleoperiertes Fahren	Unterstützung des Fahrroboters durch einen Dienstleister bei der Bewältigung der Szene mithilfe einer Fernsteuerung
Lotsen-Service	Unterstützung des Fahrroboters durch eine besonders ausgebildete Person bei der Bewältigung der Szene
elektrisches Abschleppen	Voraussetzung: für Regelungsaufgabe notwendige Hardware funktionsfähig Ansteuerung der Hardware durch Abschleppwagen mittels direkter Verbindung

2.4.8 Merkmal H: Erweiterungskonzept

2.4.8.1 Motivation

Mithilfe des autonomen Fahrens werden nicht zwangsläufig, vor allem nicht zu Beginn der Einführung, alle Einsatzbereiche abgedeckt, die für die Bewältigung aller Transportaufgaben benötigt werden. Teilbereiche verbleiben, die nicht autonom bewältigt werden

können. Um dennoch die Mobilitätsbedürfnisse der Kunden zu erfüllen, könnten Bereiche außerhalb des Einsatzbereichs des autonomen Fahrens mithilfe von Erweiterungskonzepten abgedeckt werden. Das Erweiterungskonzept beschreibt, ob und womit es ermöglicht wird, die Fahrzeugführung außerhalb des für autonomes Fahren spezifizierten Einsatzbereichs auszuführen.

2.4.8.2 Merkmalsausprägungen

- 1. *keine Erweiterung*
- 2. *Fahrer*
- 3. *teleoperiertes Fahren*
- 4. *Lotsen-Service*
- 5. *Extra-Transportmittel*

In Tab. 2.9 werden den einzelnen Konzepten Beschreibungen detaillierter Charakteristiken zugewiesen. Wenn auf das Erweiterungskonzept *Fahrer* gesetzt wird, bedingt dies, dass eine Fahrzeugführungsschnittstelle („Fahrerarbeitsplatz“) zur Verfügung steht. Außerdem wird vorausgesetzt, dass eine fahrtüchtige und autorisierte Person als Insasse die Fahrt außerhalb des Einsatzbereichs des autonomen Fahrens begleitet. Für die anderen denkbaren, aus heutiger Sicht noch futuristisch wirkenden Ausprägungen (*teleoperiertes Fahren* sowie *Lotsen-Service*) ist ein für diese Variante notwendiger Dienst bzw. eine Schnittstelle bereitzustellen.

Tab. 2.9 Ausprägungen des Merkmals H

Ausprägung	Beschreibung
keine Erweiterung	<ul style="list-style-type: none">• der Einsatzbereich wird nicht erweitert• vollständige Abdeckung eines Einsatzbereichs für spezifizierte Transportaufgaben: exklusiv-autonomes Fahrzeug• bei Überdeckung des Einsatzbereichs mit dem von aktuellen Fahrzeugen: vollautonomes Fahrzeug
Fahrer	<ul style="list-style-type: none">• Übernahme der Fahraufgabe durch einen Menschen
teleoperiertes Fahren	<ul style="list-style-type: none">• Übernahme der Fahraufgabe durch einen externen Operator
Lotsen-Service	<ul style="list-style-type: none">• siehe Tab. 2.8
Extra-Transportmittel	<ul style="list-style-type: none">• Überführen des Fahrroboters an den Grenzen des Einsatzbereichs zu einem Extra-Transportmittel, sodass dieses Transportmittel die Transportaufgabe weiter ausführt• Beispiel: Langstreckentransport von Stadtfahrzeugen mithilfe eines „Autozugs“ oder mithilfe eines Konzepts ähnlich einer elektronischen Deichsel

2.4.9 Merkmal I: Eingriffsmöglichkeiten

Nach Donges [3] müssen die drei primären Fahraufgaben Navigation, Bahnführung und Stabilisierung erfüllt werden, um ein Fahrzeug zu einem Fahrtziel zu führen. Die Stabilisierungsaufgabe wird u. a. bei Löper [1] durch die Regelungsaufgabe („Control Level“) ersetzt: Die Regelungsaufgabe beinhaltet die Stabilisierung, und darüber hinaus besitzt sie die Möglichkeit, das Fahrzeug in einen fahrdynamisch instabilen Zustand zu überführen, mit dem Ziel, die Fahraufgabe zu erfüllen. Somit werden im Folgenden die für den Menschen relevanten Fahraufgaben Navigation, Bahnführung und Regelung betrachtet.

Diese Fahraufgaben werden nach der Definition des vollautomatisierten Fahrens komplett dem Fahrroboter übergeben: Bekommt der Fahrroboter ein Fahrtziel vorgegeben, erfüllt dieser die Navigations-, Bahnführungs- und Regelungsaufgabe und führt das Fahrzeug zu dem Fahrtziel. Zwar muss der Fahrroboter diese Fahraufgaben erfüllen, der Aufbau der Architektur des Fahrroboters ist davon jedoch zunächst unabhängig. Im Gegensatz dazu werden aktuelle Serienfahrzeuge, mit Ausnahme von Gefahrensituationen (ABS, ESC, AEB), durch den menschlichen Fahrer geführt. Dem Menschen wird aktuell immer die Möglichkeit geboten, Assistenzsysteme durch die Betätigung der Stellelemente an seinem Fahrer Arbeitsplatz zu korrigieren oder zu übersteuern. Somit existieren zwei Instanzen – der Insasse sowie der Fahrroboter – die prinzipiell die Fähigkeiten besitzen, ein Fahrzeug zu führen.

Zusätzlich existieren Ideen und Konzepte der Fahrzeugfernsteuerung (Tele-Operation), bei denen fahrzeugexterne Instanzen in die Fahrzeugführung eingreifen. Existieren eine Kommunikation und eine entsprechende Schnittstelle für die Fahrzeugaußenwelt, dann besitzen diese externen Instanzen ebenfalls die Möglichkeit, auf die Fahrzeugführung Einfluss zu nehmen. Somit können insgesamt die drei Instanzgruppen *Intern*, *Fahrzeug* und *Extern* die Fahrzeugführung übernehmen.

Für die vereinfachte Beschreibung des Merkmals sind die Insassen (volljährig, minderjährig, Menschen mit einschränkender Behinderung etc.) zur Gruppe *Intern* und die sich außerhalb des Fahrzeugs befindenden Einflussgrößen (hoheitliche Autoritäten (z. B. Polizei), Fahrzeughalter (wenn nicht Teil der Gruppe *Intern*), Bevollmächtigter etc.) zur Gruppe *Extern* zusammengefasst. Werden die Instanzen unabhängig voneinander betrachtet, ergeben sich folgende Fragen bezüglich deren Eingriffsmöglichkeiten:

1. Auf welcher Fahrzeugführungsebene hat die Instanz die *Möglichkeit* einzugreifen?
2. Für welche Fahrzeugführungsebene hat die Instanz die *Befugnis* einzugreifen?

Die erste Frage wird durch das Fahrzeugkonzept des Use-Case beantwortet. Soll die Instanz die Möglichkeit haben einzugreifen, dann wird vorausgesetzt, dass eine geeignete Schnittstelle für diese Instanz im Fahrzeugkonzept vorgesehen ist. Die zweite Frage erfordert eine rechtliche Regelung, die definiert, welche Befugnisse für Instanzen entsprechend deren Eigenschaften und Zuständigkeiten vergeben werden. Wer diese Regeln erstellt und prüft, ob es eine Art Fahrprüfung für die unterschiedlichen Ebenen gibt und Autorisierungen wie Führerschein oder Zugangs codes benötigt werden, soll hier nicht weiter ausgeführt werden.

Daraus folgen unterschiedliche Kombinationen zwischen Möglichkeiten des Eingriffs, die das Fahrzeugkonzept bereitstellt, und der Befugnis eines Eingriffs, die eine Instanz besitzt:

Tab. 2.10 Kombinationen von Möglichkeiten und Befugnis zur Übernahme der Fahrzeugführung

Variante	Möglichkeit des Eingriffs, vorgegeben durch das Fahrzeugkonzept	Befugnis zum Eingreifen, die die Instanz besitzt
a)	auf allen drei Ebenen (Navigation, Bahnführung und Regelung)	auf allen drei Ebenen
b)	auf allen drei Ebenen	keine (z. B. Minderjähriger als Fahrzeugführer)
c)	keine	auf allen drei Ebenen (z. B. Fahrer auf Rücksitz, der nicht eingreifen kann)
d)	auf einer bestimmten Ebene	auf einer anderen Ebene

Lediglich Variante a) führt dazu, dass der Fahrroboter durch die Instanz in einer der Ebenen der Fahraufgabe beeinflusst und/oder überstimmt werden kann.

Für die Beschreibung der Use-Cases folgt daraus, dass die Instanzen aufgelistet werden, bei denen mindestens eine Befugnis mit einer angebotenen Möglichkeit durch das Fahrzeugkonzept übereinstimmt.

Zusätzlich wird angenommen, dass durch eine rechtliche Regelung der Missbrauch geahndet und somit verhindert wird. Diese Annahme wird auch bei aktuellen Fahrzeugkonzepten getroffen, weshalb Kinder beispielsweise nicht durch die Technik daran gehindert werden, ein Fahrzeug zu führen, sondern durch eine entsprechende gesetzliche Regelung in Verbindung mit der Aufsichtspflicht.

Werden die Instanzen nun gleichzeitig betrachtet und können folglich die Instanzen gleichzeitig auf den drei Ebenen der Fahraufgabe wirken, stellt sich die dritte Frage:

3. Welche Instanz ist im Konfliktfall des gleichzeitigen Eingriffs dominant und wie ist die Rangordnung zwischen den Instanzen definiert? (s. Abb. 2.9)

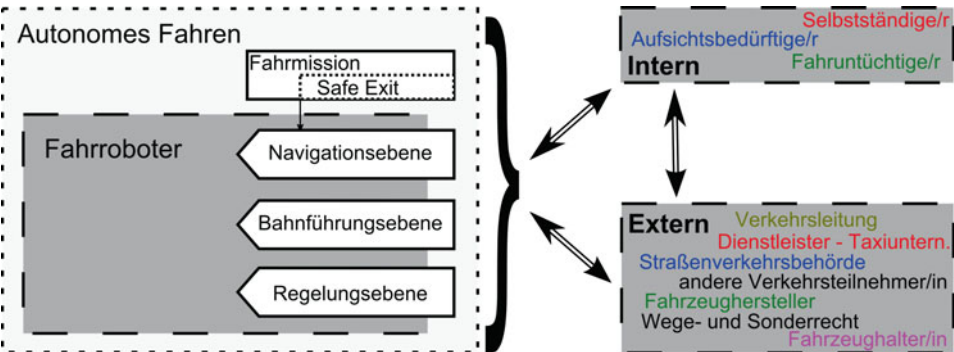


Abb. 2.9 Eingriffskonflikt zwischen Instanzen bei der Ausführung der Fahraufgabe

Um diese Frage für die Beschreibung der Use-Cases zu beantworten, muss der Eingriff der Instanzen mit einer Priorität belegt werden. Welche Instanz dominiert die anderen und bestimmt damit das Fahrzeugverhalten auf den unterschiedlichen Ebenen der Fahraufgabe? Eine Rangordnung der Instanzen ist bei der Fahrzeugauslegung zu implementieren. Dabei ist zu beachten, dass zusätzlich zu der Rangordnung zwischen den Instanzen auch eine Rangordnung zwischen den Ebenen der Fahraufgabe existiert: Die Regelung überstimmt immer die Bahnführung und die Bahnführung immer die Navigationsebene; deshalb ist zusätzlich definiert, dass nur auf einer Ebene durch *Intern* oder *Extern* eingegriffen werden kann. Die Instanz mit der höchsten Priorität unterbindet die anderen Eingriffe.

Mithilfe des autonomen Fahrens besteht die Möglichkeit, dass ausschließlich Personen befördert werden, die nicht die Fähigkeit besitzen, die Fahraufgabe auszuführen oder die Fahrmission zu ändern. Um einem Insassen aber immer die Möglichkeit zu geben, auf schnellstem Weg sicher auszusteigen, ist der Safe-Exit als besondere Fahrmission eingeführt. Bekommt der Insasse auf den Safe-Exit Zugriff mit der höchsten Priorität, kann er zwar das Fahrtziel nicht unbedingt ändern, aber möglichst schnell das Fahrzeug verlassen.

2.5 Grundlegende Definitionen

Grundlegende Begriffe, die zur Beschreibung der Use-Cases verwendet wurden, sind im Folgenden definiert.

Assistiert: Automatisierungsgrad 1 nach Bast [1]: „Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt.“

- Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.
- Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein.“

Autonomes Fahren: Die Fahraufgabe nach Donges [3] wird „vollautomatisiert“ ausgeführt. Diese Definition wird erweitert um die Annahme, dass die Ausführung der Fahraufgabe auf Basis maschinell autonomen Verhaltens, innerhalb eines vorher festgelegten Verhaltensrahmens, geschieht.

Autonomes Fahrzeug: Das Fahrzeug ist mit einem Fahrroboter ausgestattet und besitzt deshalb die Möglichkeit, autonom zu fahren. Welche Bereiche dieses autonome Fahrzeug abdeckt, ist nicht definiert.

Bahnführen: Laut Donges besteht die Bahnführungsaufgabe „(...) im Wesentlichen darin, aus der vorausliegenden Verkehrssituation sowie aufgrund des geplanten Fahrtablaufs die als sinnvoll erachteten Führungsgrößen wie Sollspur und Sollgeschwindigkeit

abzuleiten und antizipatorisch im Sinn einer Steuerung (open loop control) einzugreifen, um günstige Vorbedingungen für möglichst geringe Abweichungen zwischen Führungs- und Istgrößen zu schaffen“.[3]

Driver-Only: Automatisierungsgrad 0 nach BASt [1]: „Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen/Verzögern) und die Querverführung (Lenken) aus.“

Dynamische Elemente: Dynamische Elemente sind nach Geyer et al. [5] temporal oder spatial variable Elemente wie andere Verkehrsteilnehmer, Zustände von Lichtsignalanlagen, Licht- und Wetterbedingungen.

Einsatzbereich: Ein durch die Szenerie explizit und durch die erlaubte Geschwindigkeit implizit spezifizierter räumlicher und/oder zeitlicher Bereich, in dem das Fahrzeug autonom durch den Einsatz des Fahrroboters bewegt werden kann.

Einsatzgrenze¹: Die Einsatzgrenze ist explizit durch die Szenerie und implizit z. B. durch eine Geschwindigkeit spezifiziert und somit eine vorhersehbare Grenzlinie, an der die Fahraufgabe übergeben wird.

Exklusiv-autonomes Fahrzeug (autonomous-only vehicle): Ein Fahrzeug, das alle Strecken, für die es als Fahrzeug spezifiziert ist, von Start bis Ziel autonom fährt. Diese Definition geht über die Unterteilung des Automatisierungsgrads des Fahrens (BASt [1]) hinaus und beschreibt das Fahrzeug an sich.

Fahrer: Der Fahrer ist der (geschlechtsneutral gemeinte) fahrzeugführende Mensch ohne weitere Spezifikation der Fahrfähigkeit, also innerhalb der Bandbreite der Menschen, die eine Fahrerlaubnis besitzen. Er ist das Subjekt der Autonomie bei nicht vollautomatisiertem Fahren.

Fahrmission: Die Fahrmission beschreibt die Fahrt vom Start zum Ziel als Ausführung einer Transportaufgabe.

Fahrroboter: Der Fahrroboter ist die Implementation der maschinellen (Fahr-)Fähigkeiten. Der Fahrroboter besteht aus Hardware-Komponenten (Sensoren, Prozessoren und Aktoren) und Software-Elementen. Er agiert als Hard- und Software analog zur Rolle des Fahrers in heutigen Fahrzeugen als Subjekt². (Die Begriffsbildung für dieses System ist nicht abgeschlossen.)

Funktionsgrenze³: Eine im erlaubten Einsatzbereich auftretende, nicht im Detail vorhersehbare Bedingung, die einer Fortsetzung der autonomen Fahrt entgegensteht. Auch wenn die Grenze nicht vorhersehbar ist, erkennt sie der Fahrroboter dennoch frühzeitig.

Maschinelle (Fahr-)Fähigkeiten: Mit den maschinellen (Fahr-)Fähigkeiten sind die Fähigkeiten der Perzeption, Kognition, Verhaltensentscheidung und die Verhaltensausführung gemeint.

1 Die Einsatzgrenze entspricht der Systemgrenze Kategorie 1 der BASt-Betrachtung [1].

2 „A system which is capable of taking decisions depending on sensor data processed internally has additional degrees of freedom as compared to one with direct sensor data to actuator feedback or one without any capability of control actuation. The former one is termed a ‘subject’, the last one an ‘object’ (...)”[4]

3 Die Funktionsgrenze entspricht der Systemgrenze Kategorie 2 der BASt-Betrachtung [1].

Navigieren: Nach Donges umfasst das Navigieren „(...) die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute aus dem zur Verfügung stehenden Straßennetz sowie eine Abschätzung des voraussichtlichen Zeitbedarfs. Wenn Informationen über aktuelle Störeinflüsse wie z. B. Unfälle, Baustellen oder Verkehrsstauungen vorliegen, kann eine veränderte Routenplanung erforderlich werden.“ [3]

Safe-Exit: Der Safe-Exit ist eine besondere Fahrmission. Diese überführt das Fahrzeug auf schnellstem Weg in einen Zustand, der es dem Insassen ermöglicht, das Fahrzeug sicher zu verlassen.

Situation: Eine eindeutige Definition des Begriffs Situation für die Use-Case-Beschreibung steht noch aus. Insbesondere ist zwischen einer „objektiven, allwissenden Situation(-beschreibung)“ und einer „subjektiven, projektiven Situation(-beschreibung)“ zu unterscheiden.

Stabilisieren: Als Erfüllung der Stabilisierungsaufgabe hat nach Donges „(...) der Fahrer durch entsprechende korrigierende Stelleingriffe dafür zu sorgen, dass im geschlossenen Regelkreis (closed loop control) die Regelabweichungen stabilisiert und auf ein für den Fahrer annehmbares Maß kompensiert werden.“ [3]

Szene: Die Szene, definiert nach Geyer et al. [5], besteht aus der Szenerie, dynamischen Elementen und optionalen Fahrhinweisen. Eine Szene startet entweder mit dem Ende der vorherigen Szene oder –im Fall der ersten Szene– mit einer definierten Startszene. In einer Szene sind alle Elemente, deren Verhalten und die Position des Ego-Fahrzeugs definiert. Die dynamischen Elemente ändern in einer Szene ihren Zustand.

Szenerie: Unter dem Begriff der Szenerie nach Geyer et al. [5] wird die statische Umgebung des Fahrzeugs verstanden. Damit sind u. a. die Geometrie von vordefinierten Straßentypen, die Anzahl an Fahrstreifen, der Straßenverlauf, die Position von Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen sowie weitere statische Objekte, wie z. B. Baustelleneinrichtungen sowie natürliche (z. B. Sträucher und Bäume) oder künstliche Gebilde (z. B. Häuser, Wände) gemeint.

Transportaufgabe: Die Transportaufgabe beschreibt den Transport eines definierten Transportgegenstandes (Fahrzeug, Ladegut, Passagier usw.) von einem Startort zu einem Zielort. Beispiele für Transportaufgaben sind ein Fahrzeug zu parken oder einen Passagier zu einem gewünschten Zielort zu bringen.

Vollautomatisiert: Automatisierungsgrad 4 nach Bast [1]: „Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall.“

- Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen.
- Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf.
- Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt.

Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen.“

Vollautonomes Fahrzeug: Ein solches Fahrzeug kann auf gleichem Niveau wie „Driver-only“-Fahrzeuge nahezu alle Strecken autonom fahren. Diese Definition geht über die Unterteilung des Automatisierungsgrads des Fahrens (BASt [1]) hinaus und beschreibt das Fahrzeug an sich.

Literatur

1. Gasser, T.M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen – Fahrzeugtechnik (F), vol. 83. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 2012
2. Anlehnung an das Autonomieverständnis nach Kant interpretiert durch Feil, E.: Autonomie und Heteronomie nach Kant. Zur Klärung einer signifikanten Fehlinterpretation. In: Freiburger Zeitschrift für Philosophie und Theologie, 29/1–3, 1982, S. 389–441 (abgedruckt in Feil, E. Antithetik neuzeitlicher Vernunft. „Autonomie – Heteronomie“ und „rational – irrational“, Göttingen 1, Teil I, S. 25–112)
3. Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, H. et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, S. 15–23, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
4. Dickmanns, E.D.: Subject-object discrimination in 4D dynamic scene interpretation for machine vision. In: [1989] Proceedings. Workshop on Visual Motion, Irvine, CA, USA, 20–22 March 1989, pp. 298–304. doi: 10.1109/WVM.1989.47122
5. Geyer, S.; Baltzer, M.; Franz, B.; Hakuli, S.; Kauer, M.; Kienle, M.; Meier, S.; Weißgerber, T.; Bengler, K.; Bruder, R.; Flemisch, F. O.; Winner, H.: Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use-Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance. IET Intelligent Transport Systems. Zur Veröffentlichung angenommen. 2013
6. Kempen, B.: Fahrerassistenz und Wiener Weltabkommen. In: 3. Sachverständigentag von TÜV und DEKRA: Mehr Sicherheit durch moderne Technologien, 25./26. Februar 2008 in Berlin
7. Kategorien der Verkehrswege für den Kfz-Verkehr (3.4.1) aus den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung Ausgabe 2008
8. Löper, C.; Flemisch, F.: Ein Baustein für hochautomatisiertes Fahren: Kooperative, manöverbasierte Automation in den Projekten H-Mode und HAVEit. 6. Workshop Fahrerassistenzsysteme in Hößlinsülz, 2009

Human and Machine

J. Christian Gerdes

The very act of driving conjures a range of strong and very human emotions. Whether it is the feeling of freedom that the mobility of the car provides, the frustration of being stuck in traffic, the panic when realizing a potential collision looms or the joy of an open road with a favorite song on the radio, driving is a human experience. With automated vehicles, however, that experience changes – both for passengers in the automated car and other road users who have to walk or drive alongside it as part of the social experience of traffic. The car ceases to be simply an extension of its human driver and becomes an agent in its own right, navigating through the highways and rules of human society. Given the sometimes uneasy relationship between humans and machines, what will these new interactions between humans and machines look like?

Fabian Kroeger sets the stage for this discussion by showing what our cultural heritage reflects about our views of automation. In his chapter, *Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext*, he details the long history of automated vehicle concepts and their treatment in media, beginning with Utopian visions of the benefits of such technology. His chapter traces the path from this early optimism towards the more cautionary themes found in recent film depictions of our automated future. This frames a central question running through the remaining chapters – how can the challenges of human-machine interaction be overcome to realize the promise of this technology?

A key aspect of that interaction is how automated cars will conform to the ethical standards of the human world in which they operate. Patrick Lin opens this topic with an overall discussion of *Why Ethics Matters for Autonomous Cars*. Even with the best technology imaginable, sometimes crashes will be unavoidable for automated vehicles that share the road with human drivers and programmers must decide what to do when presented with such dilemma situations. As Lin shows, such decisions raise issues of equity, discrimination and unintended consequences that must be thoughtfully considered. Christian Gerdes and Sarah Thornton take the programming aspect of this discussion a step further with *Implementable Ethics for Automated Vehicles*. Mapping philosophical concepts to engineering

concepts, they demonstrate how different approaches to ethical reasoning can be turned into algorithms that make decisions for automated vehicles. The correct choice of an ethical framework for automated vehicles is far from obvious, however, and they argue that there are benefits to taking a more deontological, or rule-based, approach to dilemma situations and a more consequentialist, or outcome-based approach to operating in traffic.

Interactions in traffic and societal acceptance depend not only upon the programming in the automated vehicles but how the automated vehicles are understood – or misunderstood – by the people around them. Ingo Wolf, in his chapter *Wechselwirkung Mensch und autonomer Agent*, discusses the psychological concept of a mental model and how such models can be critical in defining human interactions with automated systems. He outlines several possible mental models for interactions between humans and automated vehicles and, using the results of an online survey, shows which are closest to current perceptions of this technology.

This section concludes with a look at the specific challenge presented by the informal communication channels that humans use to interpret the intentions to other road users or signal their own intentions. Berthold Färber demonstrates the importance of nonverbal communication such as eye contact and gesture in his chapter *Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern*. This raises a range of questions such as how eye contact with someone in the driver seat of an automated vehicle who is not actually driving may be interpreted and what possibilities for new communication modalities might exist.

Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kultur- wissenschaftlichen Kontext

3

Fabian Kröger

Inhaltsverzeichnis

3.1 Einleitung	42
3.2 Frühe Flugzeug- und Radiotechniken legen die Grundlagen	43
3.3 Die technischen Anfänge: fahrerlos, aber nicht selbst steuernd	44
3.4 Zwischen Wunderbarem und Unheimlichem	45
3.5 Erst ein fahrerloses Auto ist ein sicheres Auto	46
3.6 Die Leitdrahtvision wird zum utopischen Leitbild	47
3.7 Der selbst gesteuerte Verkehr im Futurama von General Motors	49
3.8 Die Ästhetisierung der Leitdrahtvision	50
3.9 Die Inszenierung der Familie im selbst steuernden Fahrzeug	52
3.10 Das Interstate-System und der Traum vom Magic Highway	53
3.11 Die technische Realisierung der Leitdrahtvision und ihre bildliche Vermittlung ...	54
3.12 Die Cruise Control als Nebenprodukt der Technik-Utopie	56

F. Kröger (✉)
CNRS, ENS, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Institut d’histoire moderne et contemporaine
(IHMC), Equipe d’histoire des techniques, Frankreich
fabian.kroeger@gmail.com

3.13 Die unheimliche Verlebendigung der Maschine	57
3.14 Das fahrerlose Automobil im Film	57
3.15 Vom freundlichen Helfer zur Killermaschine	58
3.16 Das Aufkommen der Mikroelektronik und die Abkehr von der Leitkabelkonzeption	59
3.17 Knight Rider und die Bordelektronik	60
3.18 Autonome Fahrzeuge im Science Fiction-Film	61
3.19 Das Ende des Fluchtwagens im Vollautomaten ohne Interface	61
3.20 Die Wahl des Steuerungsmodus per Stimme oder Knopfdruck	62
3.21 Warum die Fernsteuerung weniger Angst macht	63
3.22 Zusammenfassung und Ausblick	64
3.22.1 Bereitet uns Siri auf Iris vor?	65
Literatur	65
Filmografie	67

3.1 Einleitung

Die Faszination des automobilen Autonomieversprechens basiert historisch vor allem auf der Kontrolle des menschlichen Fahrers über Gaspedal, Lenkrad und Bremse. Das Lenken eines Autos sei der einzige Bereich, „wo dem Machtrausch und der Erfindungsgabe noch ein freier Raum“ verbleibe, beobachtete der Semiologe Roland Barthes 1963 ([3], S. 241). Auch der Soziologe Henri Lefebvre betonte, das Automobil sei das letzte Refugium von Zufällen und Risiko in einer zunehmend kontrollierten und verwalteten Gesellschaft ([19], S. 103).

Hinter diesem Risiko verbirgt sich jedoch nicht nur die Freiheit, es drohen auch tödliche Unfälle. In diesem Sinne „teilt und konterkariert“ das Automobil „die Utopien der Moderne“, hebt die Kulturwissenschaftlerin Käte Meyer-Drawe hervor ([23], S. 111f.).

Neben das Phantasma des selbst lenkenden Menschen tritt deshalb schon früh der Traum des sich selbst steuernden Autos, das uns ohne Unfall zum gewünschten Ziel bringt. Erstaunlich ist, dass die Realisierung dieser Wunschfantasie seit fast 100 Jahren immer 20 Jahre entfernt geblieben ist ([42], S. 14). Zwischen einem Automobil, das von einem Fahrer gesteuert wird, und einem Automobil, das einen Passagier transportiert, besteht offenbar nicht nur ein technologischer, sondern vor allem ein kultureller Bruch. Fahrerlose Fahrzeuge bevölkern in erster Linie das Imaginäre der Technik, ihre Geschichte ist vor allem eine Bildgeschichte.

Der folgende Beitrag zeichnet einige der zentralen Elemente der fast hundertjährigen Bild- und Technikgeschichte des fahrerlosen Automobils aus einer kulturwissenschaftlichen Perspektive nach (vgl. auch [18]). Im Zentrum des Interesses steht dabei das Verhältnis von technischen und bildlichen Entwürfen, von industriellen Forschungsprojekten und kulturellen Imaginationen. Es wird gezeigt, wie sich die Logik des automatischen Automobils als fantastisches Objekt zwischen Wunderbarem und Unheimlichem entfaltet.¹

3.2 Frühe Flugzeug- und Radiotechniken legen die Grundlagen

Die Geschichte des fahrerlosen Automobils beginnt Anfang des 20. Jahrhunderts in den USA. Zu dieser Zeit wurde der starke Anstieg tödlicher Verkehrsunfälle zu einem immer größeren gesellschaftlichen Problem. Die Massenmotorisierung hatte in den USA schon in den 1920er-Jahren begonnen – drei Jahrzehnte früher als in Europa. Allein in den ersten vier Jahren nach dem Ersten Weltkrieg wurden mehr US-Amerikaner bei Autounfällen getötet, als zuvor in Frankreich gefallen waren ([27], S. 25). Insgesamt führte der motorisierte Straßenverkehr in den 1920er-Jahren zum Unfalltod von etwa 200.000 US-Bürgern, die weitaus größte Zahl davon waren Fußgänger ([27], S. 21).

Das Fehlverhalten der Autofahrer wurde als Hauptunfallursache ausgemacht. Dass Infrastruktur und Fahrzeugkonstruktion ebenfalls entscheidende Faktoren der Unfallausprägung und -schwere sind, wurde erst wenig in Rechnung gestellt. Die Idee einer maschinellen Substitution menschlicher Fehleranfälligkeiten drängte sich also geradezu auf.

Zu den materiellen Bedingungen, die ein unfallfreies, sich selbst steuerndes Automobil überhaupt erst denkbar machten, gehörten zwei neue technische Entwicklungen aus dem Bereich der Luftfahrt und der Radiotechnik:

Als Erstes stellte Lawrence B. Sperry (1892–1923) im französischen Bezons nahe Paris im Juni 1914 den ersten gyroskopischen *Airplane Stabilizer* für Flugzeuge vor, der heute als erster Autopilot gilt. Vor den Augen staunender Zuschauer stieg sein Mechaniker während des Fluges auf den rechten Flügel, während Sperry im Cockpit aufstand und seine Hände über den Kopf hob. Das System basierte auf dem Gyrokompass, den sein Vater Elmer A. Sperry (1860–1930) erfunden hatte ([6], S. 183). Es balancierte das Flugzeug automatisch aus, nahm dem Piloten allerdings noch nicht völlig das Steuern ab. John Hays Hammond (1888–1965) stellte etwa zur gleichen Zeit ein System zur automatischen Kursstabilisierung vor. Die Erfindungen von Sperry und Hammond bereiteten der Kommerzialisierung des Autopiloten den Weg ([7], S. 1253 ff.; [13], S. 1258 ff.).

Zweitens stellte der Beginn der Radiotechnik eine der technischen Voraussetzungen dar, um ein selbst steuerndes Automobil realisieren zu können. Die neue Wissenschaft der *Radioguidance* befasste sich mit der Fernsteuerung beweglicher Mechanismen mittels

¹ Die Bezeichnungen selbst steuerndes, automatisches und autonomes Fahrzeug werden hier synonym verwendet.

Funkwellen ([12], S. 171). Entwickelt wurde diese Technologie u. a. vom US-Militär, das mit ferngesteuerten Torpedos, Schiffen und Flugzeugen experimentierte.

3.3 Die technischen Anfänge: fahrerlos, aber nicht selbst steuernd

Diese Pionierarbeiten führten zum ersten fahrerlosen Automobil, das die Ingenieure des Radio Air Service auf dem McCook-Luftwaffentestgelände in Dayton, Ohio, am 5. August 1921 der Öffentlichkeit vorstellten.

Das 2,5 Meter lange Gefährt (s. Abb. 3.1) wurde per Funk aus einem 30 Meter hinter ihm fahrenden Armeelastwagen gesteuert. Genau genommen handelte es sich also noch nicht um ein autonom selbst lenkendes, sondern um ein ferngesteuertes Fahrzeug – der Fahrer befand sich lediglich außerhalb des Wagens. Festzuhalten ist hier, dass die Geschichte des fahrerlosen Automobils von Beginn an mit dem Militär als Akteur verbunden ist und dass es sich von Anfang an um eine Mediengeschichte handelt: Die Presse berichtete darüber und veröffentlichte Fotos des Prototyps [28].

1925 sorgte ein weiteres ferngesteuertes Auto namens *American Wonder* für Aufsehen, als es über den New Yorker Broadway fuhr [32].² Es war von der Firma Houdina Radio Control entwickelt worden. Auch hier spielte militärisches Know-how eine Rolle: Francis P. Houdina hatte als Elektrotechniker in der US-Armee gearbeitet. Auch das *American Wonder* wurde aus einem zweiten Fahrzeug per Funkfernsteuerung gelenkt.

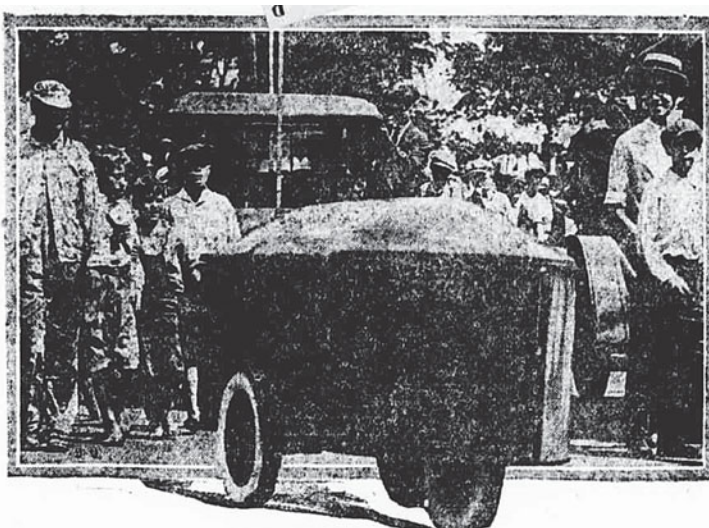


Abb. 3.1 Das erste ferngesteuerte Fahrzeug (USA 1921) (Foto aus: [33])

² Durch einen fehlerhaften OCR-Scan des TIME-Artikels wurde der Name American Wonder zu Linrrican Wonder verfälscht. Dies ist in zahlreichen Artikeln übernommen worden.



Abb. 3.2 Ferngesteuertes Fahrzeug bei einer Safety Parade (USA 1930er-Jahre) [30]

In den 1930er-Jahren traten verschiedene Ableger dieses ferngesteuerten Automobils in der Öffentlichkeit auf. Zum einen wurde es wegen seiner aufmerksamkeitseconomischen Qualitäten als kommerzieller Werbeträger eingesetzt. Zum anderen bekam es unter der Leitung des Funktechnikers Captain J. J. Lynch eine führende Rolle bei sogenannten *Safety Parades* (s. Abb. 3.2) für die Straßenverkehrssicherheit.

Von 1931 bis 1940 führte Lynch das ferngesteuerte Fahrzeug in 37 von 48 US-Bundesstaaten vor. 1934 zeigte er den Wagen sogar in Australien. Bremse, Lenkung und Hupe des vor ihm fahrenden Fahrzeugs betätigte er mithilfe einer Morsetaste. Der Code wurde über eine kugelförmige Antenne empfangen, es gibt aber auch Berichte über ein Kabel zwischen den Fahrzeugen. In Buffalo und auf dem Utica Airport wurde das Auto 1933 sogar von einem Flugzeug aus ferngesteuert.

Für Verkehrssicherheitskampagnen bot sich das fahrerlose Auto in geradezu idealer Weise an. Die Sicherheit des modernen Automobils hänge vom Fahrer ab, betonte Lynch anlässlich einer Fahrsicherheitskampagne. Da das fahrerlose Automobil alle Verkehrsregeln beachte, diene es den Autofahrern als Vorbild.

3.4 Zwischen Wunderbarem und Unheimlichem

Die Presse kündigte das ferngesteuerte Automobil als *phantom auto* [29], *robot car* [31] oder *magic car* [30] an. Diese Metaphern zeigen, dass das fahrerlose Automobil schon früh als fantastisches Objekt wahrgenommen wurde. Es nimmt bis heute genau jenen Platz zwischen Wunderbarem und Unheimlichem ein, den Tzvetan Todorov der phantastischen Literatur zuschrieb [39].

„Wir sausten los, ohne daß jemand das Steuerrad hielt, flitzten um Ecken, wichen andern ebenso feinen Kraftkutschen aus, niemand hupte.“ ([16], S. 7f.). Der deutsche Schriftsteller

Werner Illing beschreibt in seiner frühen Automatisierungsutopie *Utopolis* (1930) das Wunderbare der „geheimnisvoll von selbst lenkenden Autos“ ([16], S. 37). Wir werden in eine Gesellschaft versetzt, in welcher „der Maschinen-Automat das Werk der Hand“ ([16], S. 19) ersetzt hat – und somit auch das Steuerhandwerk. „Das Wunderbarste [sic!] daran war, daß der Wagen ... sich so benahm, als hätte er sämtliche nur denkbaren Verkehrsvorschriften auswendig gelernt.“ ([16], S. 38). Wie bei Lynchs *Safety-Shows* in den USA besteht der besondere Reiz des fahrerlosen Autos auch hier im Einhalten sozialer Normen.

Auch die technische Seite dieser literarischen Utopie wird erklärt. Jeder Wagen habe vorne ein kleines Prismenauge, das mit „unauffällig in die Hauswände eingelassen(en)“ Ampeln kommuniziere. „Durch wechselnde Spiegelreflexe regulieren diese mechanischen Augen Geschwindigkeiten und Lenkung.“ [16] Auch ein Navigationssystem gibt es, das an heutige GPS-Geräte erinnert:

An Stelle des Lenkrads fand ich eine Metallplatte, in die sehr fein und deutlich der Stadtplan eingätzt war. Darüber einen nagelscharfen Zeiger. Kaum hatte ich diesen ein wenig verschoben, fuhr der Wagen an und jagte durch Straßen, die ich noch nicht kannte. ([16], S. 38)

Auf die Beschreibung des Wunderbaren selbst lenkender Automobile folgt die literarische Ausschmückung seines unheimlichen Potenzials. Der US-amerikanische Science Fiction-Autor David H. Keller beschreibt in seiner Kurzgeschichte *The Living Machine* (1935) die Erfindung eines selbstfahrenden Autos, das mit Sprachbefehlen navigiert werden kann [17]. Zunächst werden die Vorteile genannt. Die „lebendige Maschine“ habe zur Senkung der Unfallzahlen beigetragen und das Auto neuen Nutzerschichten geöffnet ([17], S. 1467):

Alte Menschen begannen, den Kontinent in ihren eigenen Autos zu überqueren. Junge Leute nutzten das fahrerlose Auto zum Petting. Blinde befanden sich zum ersten Mal in Sicherheit. Eltern konnten ihre Kinder in dem neuen Auto sicherer zur Schule schicken, als in den alten Autos mit Chauffeur.“ ([17], S. 1470, Übers. d. A.)

Die Geschichte schlägt um, als ein Mechaniker bemerkt, dass die Autos lebendig geworden sind. „Autos, außer Kontrolle, rasten die öffentlichen Straßen entlang, jagten Fußgänger, töteten kleine Kinder, überfuhren Zäune.“ ([17], S. 1473, Übers. d. A.) Dieses imaginäre Phantasma des Kontrollverlusts über die fahrerlosen Maschinen wird sich als dominantes Muster durch das 20. Jahrhundert ziehen.

3.5 Erst ein fahrerloses Auto ist ein sicheres Auto

Seinen ersten filmischen Auftritt hat das fahrerlose Automobil im US-amerikanischen Verkehrserziehungsfilm *The Safest Place* (1935). Der von General Motors (GM) in Auftrag gegebene und von Jam Handy (1886–1983) produzierte Kurzfilm zeigt ein Auto ohne Fahrer, das mustergültig die Verkehrsordnung einhält. Dieses Fahrzeug bleibt immer in der

Spur, vergisst beim Abbiegen nie zu blinken, beachtet alle Stoppszeichen und überholt nie in gefährlichen Kurven. Ähnlich hatte auch Lynch begründet, weshalb er mit fahrerlosen Fahrzeugen für Sicherheit warb.

The Safest Place inszeniert die Vision des selbstfahrenden Autos nicht als technisch realisierbare Möglichkeit, sondern als moralisches Denkmodell. Es ist allein der Fahrer, der in diesem Film für Unfälle verantwortlich gemacht wird. Er sei für die Sicherheit viel bedeutsamer als die Technik – gerade deshalb soll er sich wie ein Automat verhalten.

Der blinde Fleck des Films ist die Maschine: Sie wird nicht als Risikofaktor begriffen. Es bleibt ausgeblendet, dass Unfälle auch passieren, wenn der Fahrer keine Fehler macht. Dies ist nicht verwunderlich, denn damals war die Autoindustrie noch nicht davon überzeugt, Sicherheitsforschung betreiben zu müssen ([37], S. 161). Visuell bringt der Film dieses Paradox der unfehlbaren Maschine eindrucksvoll auf den Punkt: Die Kamera filmt den Innenraum des Wagens von der Rückbank aus. Wie von Geisterhand dreht sich das Lenkrad, die Vordersitze sind leer.

Bemerkenswert ist diese Einstellung, da sich das selbst lenkende Auto aller Fahrzeuginsassen entledigt zu haben scheint. Ihre Körper sind aus dem Wagen und aus dem Bild genommen worden. Sie sitzen nun außerhalb des Wagens im Kino, vor der Leinwand. Nur ihr Blick erlaubt es den Zuschauern, sich als visuell Reisende wieder in den Wagen hineinzuversetzen. Damit spitzt der Film den Widerspruch zwischen Sicherheit und Freiheit auf ironische Weise zu: Ist das Auto erst sicher, wenn es leer ist?

3.6 Die Leitdrahtvision wird zum utopischen Leitbild

Nicht nur literarische und filmische Fantasien kreisen um das fahrerlose Auto. Etwa zur gleichen Zeit – Mitte der 1930er-Jahre – begann die US-amerikanische Öl- und Automobilindustrie gemeinsam mit Stadtplanern, Industriedesignern, Architekten, Verkehrswissenschaftlern und Vertretern der Politik an futuristischen Entwürfen künftiger Highways zu arbeiten ([42], S. 2). Das automatische Fahren löste sich nun von den frühen Fernsteuerungsversuchen und avancierte unter dem Vorzeichen eines automatisierten Verkehrssystems zum utopischen Leitbild. Die Idee der automatisierten Straße wurde auf reale Landschaften projiziert, eine sofortige Umsetzung war aber nicht geplant. Vielmehr sollte ihre Strahlkraft dazu beitragen, das Vertrauen in den Kapitalismus wiederherzustellen. Viele US-Bürger hatten im Zuge der großen Depression den Glauben an den technologischen Fortschritt verloren. Die Elite der Planer war deshalb auf propagandistische Verstärker angewiesen, die den technischen Heilsversprechen ihren Glanz zurückgeben sollten.

Bei dieser Aufgabe spielten populärwissenschaftliche Magazine wie *Popular Science* und *Popular Mechanics* eine wichtige Rolle. Sie arbeiteten stark mit Bildern, was sie zu wertvollen Quellen für bildhistorische Analysen macht. Im Mai 1938 berichtete *Popular Science* erstmals über den automatischen Verkehr der Zukunft [26]. Der Autor stellte die sogenannte Leitdrahtvision vor, die bis in die 1970er-Jahre kulturelles Leitbild bleiben

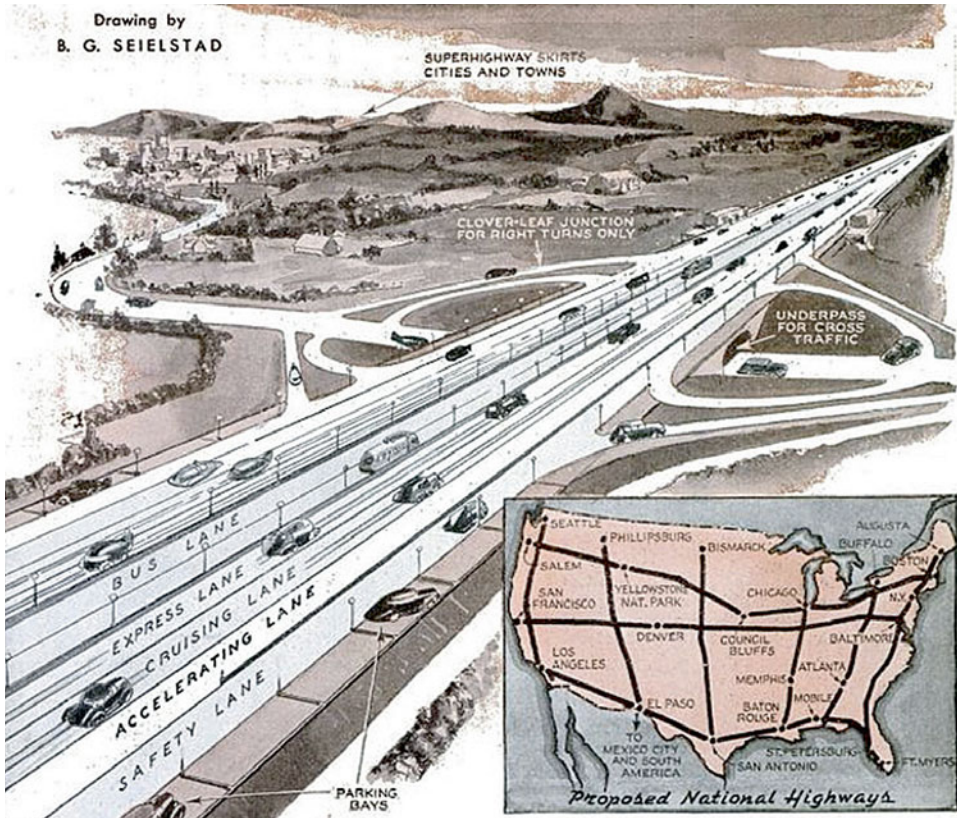


Abb. 3.3 Eine der ersten Abbildungen einer automatischen Autobahn (Ausschnitt, Zeichnung: B. G. Seielstad; [26], S. 28)

sollte: Alle Fahrzeuge folgten einem in die Fahrbahn versenkten elektromagnetischen Kabel, dessen Impulse Geschwindigkeit und Steuerung regulierten ([26], S. 28). Begründet wurde dieser Entwurf damit, das „Schlachten“ beenden zu müssen, das durch menschliche Fahrfehler und schlechte Straßen verursacht werde ([26], S. 118). Erstaunlicherweise sieht schon diese frühe Leitdrahtvision den Wechsel zwischen automatischer und manueller Steuerung vor ([26], S. 27).

Von besonderem Interesse ist hier die begleitende Zeichnung des Illustrators Benjamin Goodwin Seielstad (1866–1960), da sie eine utopische Bildsprache entwickelt, die über Jahrzehnte immer wieder in Zusammenhang mit dem automatischen Fahren auftauchen wird (s. Abb. 3.3).

Zunächst schauen wir aus der Vogelperspektive auf die Autobahn der Zukunft, die in einer schnurgeraden Fluchtlinie gen Horizont führt. Die weiß leuchtenden Fahrbahnen vereinigen sich am zu überschreitenden Horizont des Panoramas. In dieser Perspektive ist ein emphatischer Fortschrittspfeil hin zum besseren Morgen enthalten. Der strategisch

eingesetzte Fluchtpunkt betont die Aussage dieses Bildes: Indem er sich mit dem Betrachter bewegt und somit unerreichbar ins Nirgendwo flüchtet, besitzt er eine Affinität zum Utopischen.

Des Weiteren unterstreicht der überaus hoch liegende Augenpunkt die Bedeutung des Panoramas. Der Blick auf die Autobahn scheint aus der Perspektive eines Heißluftballons zu stammen. Die visuelle Distanz unterstreicht den Entwurfscharakter dieser Vision, die wir mit Ernst Bloch eine utopische „Wunschlandschaft“ ([5], S. 935) nennen können.

Popular Science erläutert die im Artikel aufgezeigte Vision mit Berufung auf Miller McClintock (1894–1960), Direktor des Büros für Street Traffic Research der Harvard Universität. McClintock war einer der wichtigsten Vordenker der US-Verkehrsplanung [27]. In seiner Dissertationsschrift *Street Traffic Control* analysierte er bereits 1925 die Ursachen für Staus und Unfälle und entwickelte neue Verkehrsregeln und Straßenbaumaßnahmen [22].

Ein bedeutsamer Anstoß für das automatische Fahren kam von einer großen Mineralölgesellschaft: Im Frühjahr 1937 brachte der Mineralölkonzern Shell McClintock mit dem Stromlinienpionier Norman Bel Geddes zusammen. Für eine Shell-Werbeanzeige sollten sie gemeinsam ein Modell der *City of Tomorrow* entwerfen ([27], S. 249). Bel Geddes hatte schon 1932 in seinem Buch *Horizons* über Urbanismus und Autodesign geschrieben [4], aber erst der Shell-Auftrag brachte ihn dazu, die Vision eines automatischen Highways zu entwickeln. Im Mai 1938 gelang es Bel Geddes dann, den GM-Konzern davon zu überzeugen, das Shell-Modell für die New Yorker Weltausstellung von 1939 weiterzuentwickeln.

3.7 Der selbst gesteuerte Verkehr im Futurama von General Motors

„Strange? Fantastic? Unbelievable? Remember, this is the world of 1960!“ ([9], S. 8). Auf der World’s Fair erhielt die Utopie des fahrerlosen Automobils erstmals eine große Bühne. *Building the World of Tomorrow* lautete das Motto der Messe, die eine technologisch verbesserte Zukunft versprach, während der Alltag von wirtschaftlicher Depression und Ahnungen eines drohenden Krieges geprägt war. Die populärste Show der World’s Fair war das heute legendäre *Futurama* von GM mit seinem Modell des Verkehrs der Zukunft. Der Begriff *Futurama* ist vom griechischen *horama* (dt.: Sicht) abgeleitet. Um in die Zukunft sehen zu können, mussten die Messebesucher das von dem Architekten Albert Kahn (1869–1942) entworfene stromlinienförmige Gebäude über gebogene Rampen betreten, in deren Ästhetik neben den künftigen Superhighways die schon genannte utopische Fortschrittsbahn wiederzuerkennen war.

Im Inneren standen 552 Plüschessel bereit, die auf ein Fließband montiert waren. In ihnen schwebten die Besucher 16 Minuten lang über eine 3000 Quadratmeter große, gigantische Modelllandschaft, die Bel Geddes entworfen hatte. Das sieben Millionen Dollar teure Diorama umfasste eine halbe Million Häuser, eine Million Bäume und 50.000 Spielzeugautos ([21], S. 110; [25], S. 74). Über Lautsprecher wurde den Besuchern erläutert, was

sie unter sich sehen konnten: 10.000 animierte Modellautos, die über eine 14-spurige Autobahn rasten, verkörperten den automatischen Verkehr von Morgen, der von Radiowellen in der Spur gehalten wurde. Nur Tankstellen fehlten, sie hätten an die Abhängigkeit dieser Vision vom Öl erinnert. Auch Kirchen suchte man vergebens, denn das gesamte Futurama war bereits ein Ort der *worship*, der Huldigung eines technischen Transzendenzversprechens.

Mit dieser Inszenierung setzte Bel Geddes, der bis 1927 beim Theater gearbeitet hatte, ähnlich wie *Popular Science* auf ein Primat des Visuellen: „Einer der besten Wege, um eine Lösung jedem verständlich zu machen, besteht darin, sie zu visualisieren, zu dramatisieren“ (zit. nach [42], S. 24, Übers. d. A.). Es galt, die Wünsche der Zuschauer zu prägen und den Anspruch der Industrie auf kulturelle Hegemonie über die Zukunft zu unterstreichen. Dazu brauchte es Bilder, keine technischen Entwürfe. Das Futurama sollte den Betrachter nicht aufklären, sondern ihn einen Bildraum betreten lassen. *Wie* die Zuschauer hier die Zukunft sahen, war ebenso wichtig wie das, *was* sie sahen. Sie imitierten den „gottgleichen Blick des Piloten“, den auch die modernistischen Planer auf die chaotischen Städte warfen, im Wunsch, diese zu kontrollieren ([25], S. 77f.). Zugleich fiel die Vorstellung des Futuramas in die Zeit der Superhelden (der erste *Superman*-Comic erschien 1938), deren Aufstieg von der Erde als Rettungsallegorie aus der Depression gelesen werden kann.

Wie die automatischen Highways technisch funktionieren sollten, blieb im Gegensatz zur hochentwickelten Bildlandschaft diffus. Dieses Ungleichgewicht ist ein typisches Merkmal aller Techno-Utopien. GM gab nur die Auskunft, nicht genauer beschriebene „Experten“ würden die Autofahrer bei Spurwechseln von Kontrolltürmen aus dirigieren ([9], S. 6, 8). Offenbar sollte der Fahrer das Steuer in der Hand behalten, aber gleichzeitig einem menschlichen Anweiser gehorchen, der seine Befehle per Funk übermittelte. Tatsächlich gibt es laut James Wetmore keine Anhaltspunkte dafür, dass die Bel Geddes'schen Highways über den Modellstatus hinaus entwickelt wurden ([42], S. 5).

Trotzdem entfaltete das Futurama kulturell eine enorme Zugkraft, und dies bis heute. Schon zwei Jahre nach der Show integrierte Science Fiction-Autor Robert A. Heinlein die aus dem Futurama bekannten automatisierten Highways in seinen Roman *Methuselahs Children* (1941) ([14], S. 5, 27; [34], S. 27). Die Kontrolle des automatisierten Verkehrs durch Leitzentralen wird darin sehr deutlich.

Außerdem spricht Heinlein hellsichtig ein Thema an, das Ende des 20. Jahrhunderts in zahlreichen Spielfilmen auftauchen wird: Eine Flucht im Auto ist wegen der totalen Überwachung der Straßen unmöglich. Nur das Überfahren eines Zauns bei manueller Steuerung macht es den Protagonisten in Heinleins Roman möglich, von der Automatikspur auf unkontrollierte normale Straßen auszuweichen ([14], S. 27f.).

3.8 Die Ästhetisierung der Leitdrahtvision

„Why Don't We Have ... CRASH-PROOF HIGHWAYS“, fragte die populärwissenschaftliche Zeitschrift *Mechanix Illustrated* 1953 ([11], S. 58 ff., 184). Der Zweite Weltkrieg hatte den Traum vom automatischen Fahren unterbrochen. Die Automobilindustrie kon-



Abb. 3.4 Weiterentwickeltes Panoramabild, USA 1953 ([11], S. 58)

zentrierte sich in den 1940er-Jahren auf die Produktion von Militärfahrzeugen. In der Nachkriegszeit blühte die Utopie des fahrerlosen Automobils aber wieder auf. Im Krieg waren neue Technologien entwickelt worden, die nun für zivile Zwecke genutzt werden sollten. Damit wurde die Leitdrahtvision technisch konkreter. Das automatische Fahren sollte mit Magnet-Detektoren realisiert werden, wie sie im Zweiten Weltkrieg zur Detektion von Landminen benutzt worden waren. Radartechnik – auch dies eine militärische Innovation – sollte den Abstand zum vorausfahrenden Wagen regulieren.

Mit dem aus der Vogelperspektive gezeichneten Autobahnpanorama ähnelt die den Artikel begleitende Illustration (s. Abb. 3.4) in verblüffender Weise der bereits besprochenen Zeichnung von 1938. Der Augenpunkt ist nun allerdings abgesenkt, als würde der Blick des Betrachters von einem dicht neben der Straße stehenden Gebäude fallen. Das Bild suggeriert damit, dass die Realisierung des automatischen Fahrens näher gerückt ist. Auch die Fahrzeuge sind nun deutlich detaillierter, das Karosseriedesign etwas futuristischer gezeichnet als in der Zeichnung von 1938.

Das Bild zeigt, dass sich das automatische Fahren in einer Übergangsphase zwischen alten und neuen Mobilitätskonzepten befindet. Zwar hat der Fahrer das Lenkrad losgelassen und sich zu den Passagieren im Fond gedreht. Die Beifahrerin muss jedoch ihren Arm verrenken, um mit den Freunden auf der Rückbank sprechen zu können. Der Zeichner

konnte es sich offensichtlich noch nicht erlauben, das Steuerrad ganz wegzulassen und die Vordersitze zu drehen. Außerdem wird hervorgehoben, dass der Fahrer das System zum Ausfahren aus der Magnetspur manuell übersteuern könne. Für ein vollautomatisches Fahrzeug war das Publikum offensichtlich noch nicht bereit.

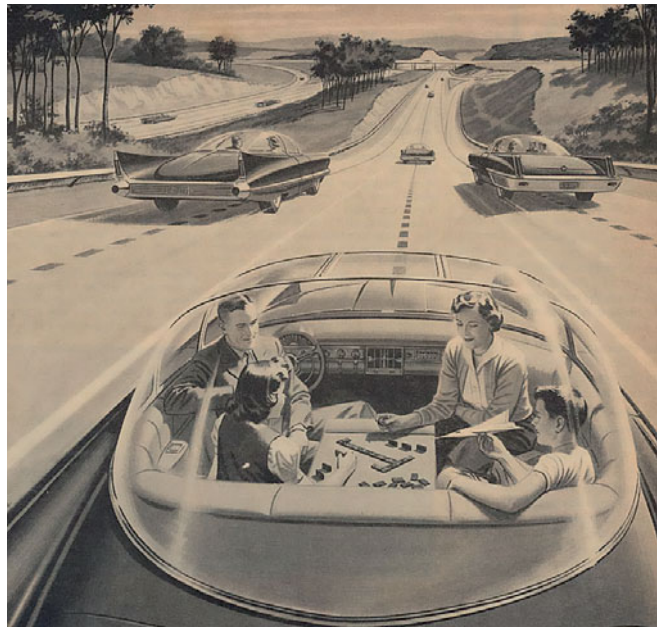
3.9 Die Inszenierung der Familie im selbst steuernden Fahrzeug

Americas Independent Electric Light and Power Companies schalteten 1956 im LIFE-Magazine eine Anzeige (s. Abb. 3.5), die bis heute zu den detailliertesten und ästhetisier-testen Darstellungen des autonomen Fahrens gehört.

Im Vordergrund ist eine große Limousine zu sehen, die auf der Mittelspur eines sich bis zum Horizont erstreckenden Autobahnbandes dahinrollt. Neben der Zentralperspektive ist die weitere Absenkung des Augenpunktes von großer Bedeutung. Während der Blick in den oben besprochenen Illustrationen aus großer Höhe und Entfernung geworfen wurde, befindet sich der Betrachter nun dicht hinter dem Wagen, was diese Vision in dramatischer Weise real erscheinen lässt.

Bedeutsam ist das große Glasdach, das mehr als die Hälfte des Bildes ausfüllt. Es lenkt den Blick in den Innenraum des Autos. Eine vierköpfige Familie sitzt um einen Tisch herum, als wäre das Auto ein Ersatzwohnzimmer. Alle Familienmitglieder werden den zeitgenössischen gesellschaftlichen Konventionen gemäß dargestellt. Der Vater besetzt den Fahrersitz, auch wenn er sich vom Lenkrad abgewandt hat. Mutter und Tochter spielen

Abb. 3.5 Detaillierte Version des Panoramas [1]



Domino, während der Sohn sein Modellflugzeug betrachtet. Angegurtet scheint aber niemand zu sein, während das Auto einer gestrichelten Linie auf der kaum befahrenen Strecke folgt.

Dieses Motiv zeigt, dass Bilder automatischer Fahrzeuge in erster Linie eine ideale Oberfläche für die Inszenierung der harmonischen Kleinfamilie waren. So definierte die populäre Frauenzeitschrift *McCalls* die Idealfamilie 1954 über das gemeinschaftliche Beisammensein und das Teilen gemeinsamer Erfahrungen ([24], S. 180). Diese *family togetherness* entwickelte sich schnell zu einem nationalen Ideal. Die 1950er-Jahre können als „Goldenes Zeitalter“ der Familie bezeichnet werden, was sich vor allem am frühen Heiratsalter beider Geschlechter und der geringen Scheidungsrate festmachen lässt und als Reaktion auf die Zeit des Krieges und der Depression interpretiert werden kann: Die Familie bildete demnach einen Gegenpol zu den zunehmend anonymisierten Arbeitsumgebungen, unter denen die persönlichen Beziehungen litten ([24], S. 177 ff.). Die Anzeige zog ihre Attraktivität aus diesen sozialhistorischen Bedingungen, indem sie ein utopisches Gegenbild zur Arbeitswelt aufzeigte. Tatsächlich lautet bis in die Gegenwart eines der wichtigsten Versprechen des autonomen Fahrens, die mit dem Steuern verbrachte Zeit in gemeinsam mit der Familie verbrachte Freizeit zu verwandeln.

3.10 Das Interstate-System und der Traum vom Magic Highway

Ein Jahrzehnt nach dem Zweiten Weltkrieg, mit dem Ende des Koreakrieges, durchliefen die USA eine Zeit dramatischer Veränderungen. Die Massenkongressgesellschaft begann sich voll zu entfalten. Die Expansion des Automobilismus, schon seit den 1920er-Jahren unverzichtbarer Bestandteil des amerikanischen Lebensstils, führte nun zu einer beschleunigten Transformation des Raumes.

Bedeutsam war vor allem der Bau des überregionalen Interstate Highway Systems 1956. Walt Disneys Fernsehfilm *Magic Highway U.S.A.* (1958) von Ward Kimball ordnet dieses gigantische Autobahnprojekt in eine lineare Fortschrittsgeschichte ein. In einer Mischung aus dokumentarischen Archivaufnahmen und fiktionalen Cartoon-Animationen erzählt der Film die Geschichte der amerikanischen Straße ([40]; [38], S. 112 f.). Den negativen Folgen der Massenmotorisierung – Pannen, Unfälle, Staus – wird die Lichtgestalt des *Highway Engineer* entgegengestellt. Er wird die Straßen bauen, die alle Übel heilen werden.

Und dazu gehört das zukünftige automatische Fahren, das wie in der LIFE-Anzeige mit dem konservativen Idealbild der amerikanischen Familie kombiniert wird (*Magic Highway U.S.A.*, ab 39'00"). Dreh- und Angelpunkte sind dabei ein patriarchales Geschlechtermodell, Vollbeschäftigung und Konsum. Eine Zeichentricksequenz zeigt, wie eine Familie in ein futuristisches Auto steigt. Nachdem der Vater das Ziel auf einem Mischpult eingegeben hat, hält er per Bildtelefon eine Geschäftskonferenz ab und wird anschließend im Büro abgesetzt. Mutter und Sohn fahren ins Shoppingcenter.

Das Versprechen des automatischen Fahrens spielte auf die langen Autofahrten von den Vorstädten (*Suburbs*) in die urbanen Zentren an. Von den 13 Millionen Häusern, die von

1948 bis 1958 in den USA gebaut wurden, entstanden 85 Prozent in den Vorstädten ([24], S. 183). Für die Familien bedeutete dies meist genau das Gegenteil von *family togetherness*: Durch die Notwendigkeit, zur Arbeit zu pendeln, hatten viele Väter kaum noch Zeit, sich um ihre Familien zu kümmern ([24], S. 184). Die Ehefrauen fuhren die Kinder im Auto zur Schule, zum Musikunterricht, zum Arzt. Ihnen fehlten soziale Kontakte, ihr Leben vollzog sich in Isolation und Langeweile. Insofern zeigt der Film ein verfälschendes Bild der Arbeitsteilung zwischen den Geschlechtern, da die Reproduktionsarbeit ausgeblendet wird.

Magic Highway U.S.A. endet damit, dass ein automatisches Fahrzeug auf einer zentralperspektivisch angelegten Autobahn dem glutroten Sonnenuntergang entgegenfährt. Damit begegnen wir erneut der utopischen Ästhetik, die sich seit den 1930er-Jahren durch die populäre Kultur zieht. Walt Disney kommentiert diese Einstellung mit den Worten, die Straße verbinde alle Nationen, sie Sorge für „ein besseres Verständnis zwischen den Völkern der Welt“ (*Magic Highway U.S.A.*, 47°05“ – 47°25“, Übers. d. A.). Das automatische Fahren führe wie ein „magischer Teppich zu neuen Hoffnungen, neuen Träumen“, hin zu einem besseren Leben in der Zukunft. Selten wird deutlicher, dass Zukunftstechnologien Teil eines gesellschaftlichen Heilsversprechens sind.

3.11 Die technische Realisierung der Leitdrahtvision und ihre bildliche Vermittlung

Bisher wurde gezeigt, wie Literatur, Film und Druckmedien das fahrerlose Auto seit den 1930er-Jahren als Teil utopischer Traumlandschaften zeigten. In den 1950er-Jahren bekam dieses literarische und bildliche Technoimaginäre eine neue Dynamik, da in der Automobilindustrie Technologien entwickelt wurden, die den automatischen Verkehr möglich machen sollten.

1953 testete GM gemeinsam mit dem Elektronikhersteller Radio Company of America (RCA) zunächst ein Miniaturmodell der automatischen Straße ([42], S. 6). Das autonome Fahren wurde dann 1956 mithilfe des Konzeptcars Firebird II im Rahmen der reisenden Werbeshow „Motorama“ popularisiert. So zeigt der Begleitfilm *Key to the Future* von Michael Kidd eine im Stau stehende Familie, die singend von einer Reise in einem Firebird II träumt, der sie so viel komfortabler voranbringen würde. Von einem Kontrollturm aus lenkt ein Uniformierter den Wagen in eine automatische Expressspur. Nun folgt der Wagen dem Leitkabel, und der Vater kann das aus Flugzeugen bekannte Steuerhorn (Yoke) ins Armaturenbrett schieben. Technisch funktionierte das System zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht ([42], S. 7).

Am 14. Februar 1958 absolvierte das erste *automatically guided automobile* im Technical Center von GM in Warren (Michigan) eine Teststrecke von einer Meile ([10]). Die Ingenieure hatten im Frontbereich eines 1958er Chevrolet zwei elektronische Fühler angebracht, die einem in der Straße verlegten Kabel folgten und das Steuerrad danach ausrichteten ([20], S. 76). GM stützte sich dabei auf Forschungen des Fernsehponiers Vladimir Zworykin (1888–1982).

Abb. 3.6 Automatisches Fahren auf einer GM-Teststrecke 1958 ([20], S. 75)



Populärwissenschaftliche Zeitschriften griffen diese Versuche mit einer pluralisierten Bildstrategie auf, deren Rhetorik sich deutlich von den techno-utopischen Zeichnungen absetzte. So berichtete *Popular Science* 1958 von einer Versuchsfahrt auf der GM-Teststrecke ([20], S. 75 ff., 227). Das erste Foto zeigt eine junge Frau, die lachend das Steuer eines automatischen Wagens loslässt und ihre Hände wie der „neue Mensch“ gen Himmel hebt (s. Abb. 3.6).

Durch die Verwendung dieses ikonischen Motivs, das Sperrys freihändige Präsentation des Autopiloten im Juni 1914 zitiert und bis heute immer wieder im Kontext fahrerloser Automobile auftaucht, lässt sich das Foto eindeutig dem Wunderbaren zuordnen. Die nach oben gestreckten Hände ähneln dem Orantengestus, mit dem der Betende um göttliche Gnade bittet.

Dieser bildliche Bezug zum Numinosen wird durch zwei dem Profanen zugehörige Fotografien geerdet: Sie zeigen erstens Bauarbeiter, die ein Führungskabel in einer Straße verlegen, zweitens das Bild eines Steuerungscomputers. Die Fotografien sollen beglaubigen, dass selbst gesteuerte Autos real existieren, und setzen sich damit von der utopischen Bildästhetik ab.

Im selben Jahr (1958) stellte GM die Studie Firebird III vor, die kein Lenkrad mehr besaß. In der Mittelkonsole befand sich ein Joystick (*Unicontrol*), der alle Fahrfunktionen – Beschleunigen, Bremsen, Lenken – vereinte. Die Leitkabelvision wurde unverändert übernommen.

3.12 Die Cruise Control als Nebenprodukt der Technik-Utopie

Zu den utopischen Visionen, die literarisch, zeichnerisch und filmisch imaginiert wurden, und den technischen Versuchssystemen, die grafisch und fotografisch in Szene gesetzt wurden, kamen Mitte der 1950er-Jahre konkrete Anwendungen hinzu.

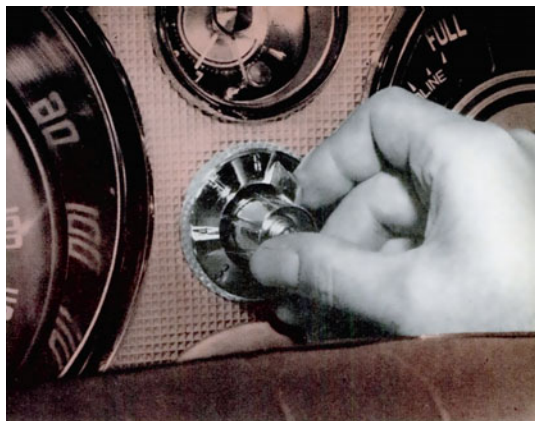
Popular Science berichtete 1954 über ein „wohlerzogenes“ Gaspedal, den von Ralph Teetor (1890–1982) entwickelten *Speed-o-Stat*. Dieser automatische Geschwindigkeitshalter und -begrenzer erfreute sich unter den Namen *Tempomat* oder *Cruise Control* bald großer Beliebtheit. Die Zeitschrift präsentierte das System als Meilenstein auf dem Weg zum automatischen Fahren und ordnete es damit in eine größere Fortschrittsbewegung ein ([35], S. 166 ff., 264; [42], S. 34). Tatsächlich verlief diese Bewegung aber umgekehrt: Mit der Entwicklung des Tempomats koppelte sich das in reduzierter und individualisierter Form automatisch fahrende Auto von der Großvision automatischer Autobahnen ab. Damit bildete der Tempomat ein Modell für die Fahrerassistenzsysteme, die das automatische Fahren heute bereits nahezu verwirklichen.

In einem *Popular Science*-Artikel von 1958 heißt es, Chrysler habe ein neues *supergadget* entwickelt, einen „Auto-Piloten“ für 86 Dollar Aufpreis ([36], S. 105 ff., 248, 250). Vom automatischen Verkehr ist nun keine Rede mehr, die utopische Vision schrumpft und kondensiert in einer Ware, die sofort verfügbar ist.

Diese neue Logik der Unmittelbarkeit manifestiert sich im begleitenden Foto (s. Abb. 3.7), das einen verchromten Drehknopf zeigt, der neben dem Tachometer am Armaturenbrett angebracht ist und der Geschwindigkeitseinstellung dient. Zu sehen ist außerdem eine Hand: Daumen und Zeigefinger sind dabei, den Schalter zu drehen.

Diese Nahaufnahme steht am Ende einer langen bildlichen Annäherungsgeschichte an das technische Objekt, die mit den fernen Landschaftspanoramen begann. Damit lassen sich historisch aufeinander folgende Bildstufen identifizieren, die vom Abstrakten zum Konkreten, von der Zeichnung zum Foto, von der Außenaufnahme zum Innenraum, von der Gesamtschau zum Detail, vom Kollektiv zum Individuum verlaufen.

Abb. 3.7 Einstellrad für den Autopiloten, Chrysler 1958 ([36], S. 105)



3.13 Die unheimliche Verlebungung der Maschine

Während Presse-, Werbe-, und Filmbilder in den 1950er-Jahren noch ganz dem Wunderbaren dieser Vision verpflichtet sind und dominante gesellschaftliche Wunschbilder in Szene setzen, treibt die Literatur die Frage um, wie stark unsere zukünftigen Autos dem Menschen ähneln werden. Sie warnt vor der Überhöhung zukünftiger Technologien und gibt unbewussten Ängsten einen Raum.

Isaac Asimovs Kurzgeschichte *Sally* (1953) wurde im selben Jahr veröffentlicht wie der oben besprochene *Popular Science*-Artikel. Asimov stellt uns vermenschlichte „Automobile“ vor, deren positronische Motoren es erlauben, dass „nie ein menschliches Wesen hinter ihrem Lenkrad“ sitzen muss ([2], S. 23). Man „gibt den Bestimmungsort an, und der Wagen findet seinen Weg.“ ([2], S. 25). Zunächst sei das autonome Fahren nur schwer durchzusetzen gewesen, habe dann aber alle Unfälle abgeschafft und „das Töten“ beendet ([2], S. 25).

Die besondere Qualität der Geschichte besteht darin, dass Asimov den *gesteigerten* Anthropomorphismus aufzeigt, der mit dieser Vision einhergeht. Die „Automatics“ sind stark verlebungt, sie werden als „zutraulich und herzlich“ beschrieben ([2], S. 27). Sie „können miteinander sprechen“ ([2], S. 45). Ihre Gefühle könne man am Motorengeräusch hören ([2], S. 43). Besonders die Cabriolets seien „sehr eitel“ ([2], S. 28). Die Automobile können auch auf „Handbetrieb“ umgeschaltet werden ([2], S. 31), man dürfe den Motor jedoch nicht abschalten, da dies dem Wagen Schmerzen bereite ([2], S. 32).

Dieser Anthropomorphismus schlägt dann wie in Kellers Kurzgeschichte von 1935 plötzlich ins Unheimliche und Bedrohliche um. Die Autos entwickeln einen eigenen Willen, sie öffnen ihre Türen nicht mehr ([2], S. 31), rollen auf einen Gegner zu ([2], S. 37) und beginnen schließlich zu töten: „Sie fanden Reifenspuren an seinen Armen und Beinen“ ([2], S. 44). Dieses Muster finden wir später u. a. in dem auf einem Roman von Stephen King basierenden Film *Christine* (1981) wieder.

3.14 Das fahrerlose Automobil im Film

Ende der 1960er -Jahre ist eine Verschiebung im Bereich der Bildgeschichte selbstfahrender Autos zu beobachten. Hatten die populärwissenschaftlichen Zeitschriften bisher die Rolle eines Leitmediums inne, das mit utopischen Bildkonzeptionen für Aufsehen sorgte, so übernahm nun das Kino diese Rolle. Damit wurde das fahrerlose Automobil endgültig ein wichtiges Element der Unterhaltungsindustrie, wie James Wetmore bestätigt ([42], S. 26).

Die kinematografischen Repräsentationen des autonomen Fahrens überschreiten in der Intensität ihrer Bildsprache deutlich den Horizont der Druckmedien. Ihre Bildwelten sind nicht nur Indikatoren gesellschaftlicher Hoffnungen, sondern vor allem bestimmter Ängste. Das aus der Literatur bekannte Muster aus Wunderbarem und Unheimlichem wird weiterentwickelt. Damit ermöglicht der Film Einblicke in einen Teil des kollektiven Imaginären,

in unbewusste Faktoren, die entscheidend zur Akzeptanz oder zur Ablehnung neuer Technologien beitragen. Außerdem zeigt sich in ihnen der Wandel in der öffentlichen Wahrnehmung selbstfahrender Automobile. Besonders interessant ist die Bewertung verschiedener Mensch-Maschine-Schnittstellen.

3.15 Vom freundlichen Helfer zur Killermaschine

Das selbstfahrende Automobil tritt erstmals Ende der 1960er-Jahre im Spielfilm auf: Als freundlicher, wenn auch eigensinniger Helfer begeistert *Herbie, The Love Bug* (1968) von Robert Stevenson in Disneys Komödie das Publikum. Der kleine anthropomorphe Rennkäfer hat ein Eigenleben: Er bewegt sich von selbst, verliebt sich in ein anderes Auto, will aus Eifersucht Selbstmord begehen, torkelt betrunken, zittert vor Wut, fiept wie ein Hund, hat Fieber. Da Herbie nicht sprechen kann, werden seine Gefühle über die Kommentare seines Mechanikers veranschaulicht, der ihn zu verstehen scheint. Das selbstfahrende Auto wird als verlebendigtes, maschinales Ebenbild des Menschen gezeigt und dient als Metapher für die merkwürdige, intensive, intime Beziehung des Menschen zum Automobil.

Herbie fällt in die Kategorie des „rein Fantastischen“, wie sie Tzvetan Todorov definiert hat [39], denn der Film liefert nie eine mechanische Erklärung für das Verhalten des Wagens. Noch ist das fahrerlose Automobil wie in Illings Roman von 1930 ganz dem Wunderbaren zuzurechnen und hat nichts Unheimliches an sich.

Bald darauf ändert sich das grundlegend: Zwei Jahre vor der Energiekrise 1973 jagt ein riesiger Tanklastwagen in Steven Spielbergs erstem Spielfilm *Duell* einen unscheinbaren Handelsvertreter durch die Berge der kalifornischen Wüste. Infernalisch dröhnt die Trucker-Fanfare dem Opfer im Nacken, grollend verschluckt der Motorenlärm das Dudeln des Radios. Der Mensch ist hier hilflos der Maschine ausgeliefert. Jeder Fluchtversuch scheitert. Zwar wird der Lastwagen von einem Menschen gesteuert, wir bekommen den Fahrer aber nie zu Gesicht. So wird die Maschine mit ihren starren Scheinwerferaugen zum eigentlichen Jäger.

Mit *Herbie* und *Duell* sind die zwei Archetypen fahrerloser Automobile geschaffen, die in den 1970er-Jahren dann ausgeschmückt werden. Herbie bekommt bis 1980 drei Fortsetzungen. Die deutsch-schweizerische B-Film-Serie *Dudu* (1971–1978) inszeniert in *Ein Käfer auf Extratour* (1973) ein Fahrzeug mit künstlicher Intelligenz, das angeblich US-Produzent Glen A. Larson zu der Serie *Knight Rider* inspiriert haben soll, auf die wir später noch zu sprechen kommen.

Parallel dazu beutet der Horrorfilm das Bedrohungspotenzial des fahrerlosen Autos aus. *The Car* (1977) treibt Spielbergs *Duell* weiter. Eine diabolische schwarze Limousine terrorisiert die Einwohner einer Kleinstadt. Mit verdunkelten Scheiben, eng stehenden, stechenden Scheinwerfern, verchromten Stoßstangen in der Form eines Rammbocks und dem Motorengebrüll eines Raubtieres wird das fahrerlose Auto zu einer Personifizierung des Bösen.

Mit *Christine* (1983) erreicht das sich selbst steuernde Auto dann den Anti-Herbie-Zenit des Horrorfilms: John Carpenters Verfilmung von Stephen Kings Roman beschreibt, wie

das lebendig gewordene Auto sich seines Fahrers entledigt: Das sich von selbst einschaltende Radio weist von Anfang an darauf hin, dass dieser Plymouth seinen eigenen Willen hat. Das Radio ist nicht nur Empfänger, sondern vor allem subtiler Sender, es ist Stimme und Seele des fahrerlosen Autos. Im Gegensatz zu *The Car* hat Christine jedoch einen Besitzer, den pubertierenden Arnie, der sich durch sie verwandelt, bald geradezu sexuell von ihr besessen ist. Tagsüber steuert er das Auto, nachts geht Christine auf Jagd, um zu töten. Dann verdunkeln sich ihre Scheiben wie bei dem Lincoln in *The Car*. Christine ist unverletzlich wie ein Zombie, denn sie kann sich auch nach dem schlimmsten Unfall selbst heilen. Der besondere Reiz des Filmes besteht darin, dass es bis zum Schluss unklar bleibt, ob es nicht doch Arnie ist, der Christine steuert.

Die genannten Filme zeigen eine Verselbstständigung des Automobils, die ihr Pendant in der Realität fand. Die negativen Folgen der Massenmotorisierung – eine hohe Anzahl von Verkehrstoten, immer längere Staus und erhebliche Smogbelastungen – wurden in den 1970er-Jahren voll sichtbar. So führte die Ölkrise 1973 zu strengeren Emissionsbestimmungen und die Ära der *Musclecars* gehörte bald der Vergangenheit an. Sowohl in den USA als auch in Europa symbolisiert diese Dekade das Ende des Goldenen Zeitalters des Automobils.

Fahrerlose Autos boten sich dem Kino geradezu an, um diese Entwicklung allegorisch ins Bild zu setzen.

3.16 Das Aufkommen der Mikroelektronik und die Abkehr von der Leitkabelkonzeption

Während im Kino das Unheimliche der Selbstbewegung beschworen wurde, begann die industrielle Forschung sich vom Konzept automatischer Highways zu entfernen. Die Lücke zwischen technischer und ökonomischer Machbarkeit sei zu groß gewesen, erklärt einer der beteiligten Ingenieure heute (vgl. [42], S. 10). Zudem musste sich die Automobilindustrie auf strengere Umweltauflagen und Sicherheitsanforderungen einstellen. Dies erforderte umfangreiche Investitionen.

Der Trend ging hin zur Forschung an autonomen Einzelfahrzeugen, die nicht auf eine Infrastruktur wie Leitkabel angewiesen sind. Vor allem Japan und die USA machten große Fortschritte bei dem Versuch, dem Auto das Sehen beizubringen: Das Team von Sadayuki Tsugawa vom Mechanical Engineering Laboratory im japanischen Tsukuba stellte 1977 das erste autonome Fahrzeug vor, das über zwei Kameras Bilder der Straße aufnehmen und verarbeiten konnte. Hans Moravec vom Artificial Intelligence Lab der US-amerikanischen Stanford University forschte von 1973 bis 1981 an Roboter-Navigation und nutzte dafür das *Stanford Cart*, ein schon 1960 konstruiertes Experimentalfahrzeug mit vier Fahrradreifen, das es im Oktober 1979 schaffte, sich mithilfe einer Fernsehkamera fünf Stunden lang ohne menschlichen Eingriff durch einen Raum mit Hindernissen zu bewegen.

Das Aufkommen der Mikroelektronik führte außerdem zu einer zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeugtechnik (Einspritzung, Zündung) bis hin zur Einführung der ersten

Bordcomputer (Check Control) im 7er BMW (E23). Mit der Vorstellung des ABS im Jahr 1978 begann die Ära aktiver Fahrerassistenzsysteme, die direkt in das Fahrgeschehen eingreifen.

3.17 Knight Rider und die Bordelektronik

Diese technischen Entwicklungen beeinflussten auch die Kulturproduktion. Das Kino kehrte der animistischen Diabolisierung des fahrerlosen Autos den Rücken und begann sich für die Bordelektronik zu interessieren.

Ein sprechendes Auto mit dem Namen KITT (Knight Industries Two Thousand) wurde zum Hauptdarsteller der Fernsehserie *Knight Rider* (1982–1986). Der schwarze Pontiac Firebird Trans Am mit der roten Lichterkette im Kühlergrill konnte sowohl manuell gesteuert werden (Norm-Modus) als auch automatisch fahren (Auto-Modus). Der Fahrroboter unterstützte den ehemaligen Polizisten Michael Knight bei der Verbrecherjagd.

KITT ist also ein Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer (s. Kap. 2). Ein Teil seiner Schaltkreise sei an der Stanford-University entwickelt worden, berichtet KITT in Anspielung auf die Entwicklung des fahrerlosen Stanford Cart (Knight Rider, Season one, Episode Just my bill – 24:49).

Knight Rider bringt die anthropomorphen Dimensionen der *Herbie*-Reihe auf den Stand der Informationsgesellschaft. Im Mittelpunkt der Serie steht der Dialog, die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine. Michael Knight kann KITT über seine Armbanduhr (ComLink) herbeirufen.³ Diese Bilder träumen nicht nur vom autonomen Fahren, sondern von einem Auto, mit dem man sprechen kann, einem Auto, das antwortet. Michael nennt KITT immer wieder *pal* (eng.) – Kumpel. Die Maschine ist ein Partner des Menschen: Auch bei manueller Steuerung – mit einem Gullwing Lenkrad – gibt sie Ratschläge. Die Sprache als Mensch-Maschine-Schnittstelle funktioniert hier reibungslos, im Gegensatz zu ihrer Problematisierung im Film der 1990er-Jahre.

Auch *Knight Rider* bespielt die historisch bekannte Achse aus Wunderbarem und Unheimlichem. Im Rückgriff auf den Bildervorrat des Horrorfilms der 1970er-Jahre liefert sich KITT ein Duell mit seinem böartigen automobilen Ebenbild KARR, einem Fahrzeug, das auf Selbsterhaltung programmiert ist.

Aber auch in dem normalerweise nicht eigenständig agierenden KITT lauert das Potenzial einer Rebellion gegen den Fahrer. Erstens kann er ihn in Ausnahmefällen überstimmen, etwa wenn dieser sich durch sein Fahrverhalten selbst gefährdet: „Ich kann nicht zulassen, dass Sie Ihr Leben in Gefahr bringen. Ich übernehme die Kontrolle.“ (Knight Rider, Season one, Episode Trust doesn't trust, 41:53). Hier zeigt sich, dass der um Autonomie kämpfende Computer HAL 9000 aus Stanley Kubricks Film *2001: Odyssee im Weltraum* (1968) der Konzeption von KITT als Vorbild diente ([15], S. 2).

³ *Knight Rider* soll von einem computerunterstützten Fahrzeug der Serie *B.J. and the Bear* (1979), Episode *Cains Cruiser*, inspiriert worden sein ([15], S. 1).

Zweitens wird auch die Möglichkeit der Umprogrammierung des Fahrzeugs durch Dritte angesprochen, was dann zu einer Bedrohung für seinen Besitzer wird. Diese Variante des Kontrollverlusts taucht auch in den aktuellen Debatten um mögliche Hackerangriffe auf autonome Fahrzeuge auf.

3.18 Autonome Fahrzeuge im Science Fiction-Film

Mit dem Jahr 1990 beginnt eine 15-jährige Hochkonjunktur autonomer Fahrzeuge im Science Fiction-Film. Das Kino zeigt in ambivalenten Dystopien, wie der Mensch sich die schöne neue Welt der automatischen Fahrzeuge aneignet oder aus ihr vertrieben wird.

Im Konflikt zwischen Mensch und Maschine lautet die zentrale Frage: Wer steuert? Die noch aus *Knight Rider* bekannte Möglichkeit, manuell das Steuer zu übernehmen, entfällt nun in manchen Filmen. Vor allem Fluchtsituationen werden zum Testfall für den Freiheitsgrad des automatischen Automobils. Zudem wird die Fehleranfälligkeit der Mensch-Maschine-Schnittstellen angesprochen. Hervorzuheben ist, dass die meisten Filme dabei weniger die Forschung am autonomen Fahren reflektieren, sondern die Entwicklung der aktiven Assistenzsysteme. An dieser Stelle seien nur drei Meilensteine genannt: Seit 1995 ist die Electronic Stability Control (ESP) verfügbar, die ein Schleudern des Fahrzeugs verhindert. Mit der 1998 von Mercedes vorgestellten DISTRONIC wurde halbautomatisches Fahren möglich. Der niederländische Hersteller TomTom brachte 2004 das erste mobile Navigationsgerät auf den Markt. Für die Popularisierung maschinenunterstützten Fahrens war diese Entwicklung von entscheidender Bedeutung, da der Fahrer sich nun daran zu gewöhnen begann, den Lenkanweisungen eines Computers zu gehorchen.

3.19 Das Ende des Fluchtwagens im Vollautomaten ohne Interface

Im Science-Fiction-Film lassen sich zwei Ausprägungen selbstfahrender Automobile unterscheiden. Erstens gibt es eine totalitäre Version, die vollautonome Fahrzeuge ohne manuelles Interface zeigt.

Der Film *Total Recall* (1990) von Paul Verhoeven inszeniert erstmals die Krise des Fluchtwagens durch das automatische Auto der Zukunft. Während die Verfolger sich in einem manuell gesteuerten Wagen nähern, versucht der von Arnold Schwarzenegger gespielte Arbeiter Douglas Quaid, in einem automatischen Taxi (Johnny Cab) zu flüchten. Den Befehl, sofort Gas zu geben, versteht der Android jedoch nicht und fragt nach einer Adresse (*Total Recall*, 00:34:00). Als Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Sprache eher hinderlich, da der Fahrroboter die Komplexität menschlicher Kommunikation nicht simulieren kann. Erst nachdem Quaid den mechanischen Chauffeur aus seiner Verankerung gerissen hat und das Auto mit einem Joystick selbst steuert, gelingt ihm die Flucht.

Die Überwachungsutopie *Minority Report* (2002) von Steven Spielberg zeichnet ein noch wesentlich dystopischeres Bild. Hier gibt es nicht einmal mehr den Ausweg, das

automatische Auto durch Vandalismus unter manuelle Kontrolle zu bringen. Der Film zeigt selbst steuernde Fahrzeuge als Element einer Kontrollgesellschaft, in der Verbrechen verhindert werden können, bevor sie passieren. Als ein Polizist beschuldigt wird, in Zukunft selbst einen Mord zu begehen, versucht er in einem der automatischen Maglev (Magnetic Levitation)-Fahrzeuge zu flüchten. Doch kurz darauf ertönt eine weibliche Stimme: „Security lockdown enabled: Revised destination: Office“ (Minority Report, 00:41:49). Der Wagen wird automatisch auf die entgegengesetzte Spur gelenkt und fährt zurück zum Hauptquartier. Das Auto ist zu einem Vollautomaten (s. Kap. 2) geworden, Behörden mit Sonderrechten können in die Steuerung eingreifen. Der Flüchtige ist identisch mit einem Gefangenen. Für ihn besteht die einzige Lösung darin, das Auto zu verlassen, indem er aus dem Fenster springt.

Diese Sequenz zeigt eine der wesentlichen Vorbehalte gegenüber dem autonomen Fahren. Einer der kulturellen Vorzüge des Automobils lag historisch in der Suggestion einer Identität mit dem Selbst. Hier entgleitet das Vehikel nicht nur der Kontrolle dieses Selbst, es wird regelrecht zur Falle, da es von außen ferngesteuert werden kann. Somit repräsentiert es genau das Gegenteil des anthropologisch dominanten, unbewussten Fluchtwunsches, dessen Einlösung das Automobil historisch versprach.

3.20 Die Wahl des Steuerungsmodus per Stimme oder Knopfdruck

Eine zweite Gruppe von Filmen zeigt eine „demokratischere“ Version des automatischen Fahrens – über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle kann der Fahrer zwischen automatischer und manueller Steuerung wählen.

Im futuristischen Thriller *Demolition Man* (1993) von Marco Brambilla ist das autonome Fahren Teil einer perfekten Welt ohne Gefahren, in der Schimpfwörter, Fleisch, Schokolade, körperlicher Sex, Benzin und scharfes Essen verboten sind. Der Film zeigt einen futuristischen Polizeiwagen, der sich sowohl automatisch als auch manuell steuern lässt. Auf den gesprochenen Befehl „SelfDrive on!“ antwortet das Auto mit einer weiblichen Stimme und das Lenkrad entfaltet sich (*Demolition Man* 12:42).

Wie in *Total Recall* wird auch hier die Interface-Tauglichkeit der Sprache für unzuverlässig befunden. Der Bordcomputer meldet einen Softwarefehler und plötzlich ist das Umschalten in den SelfDrive-Modus nicht mehr möglich. Das Auto rast in eine Kurve und auch der Schrei „Bremsen!“ kann den Unfall nicht vermeiden, da das Fahrzeug nicht reagiert (*Demolition Man*, 01:30:20). Mit dieser Sequenz erinnert das Kino daran, dass mit jeder neuen Technologie auch neue Unfalltypen entstehen.

Zwei weitere Filme betonen, dass uns die Flucht nur gelingen kann, wenn das autonome Fahrzeug auf manuelle Steuerung umgeschaltet werden kann.

Das fünfte Element (1997) von Luc Besson handelt von dem Taxifahrer Korben Dallas (Bruce Willis), der in einer völlig automatisierten Wohnung lebt und über ein Flugtaxi verfügt. Wie in vielen Filmen wird auch hier die Automatisierung mit Totalüberwachung gleichgesetzt. Zugleich wird das Haptische des Tastendrucks aber als Garant einer letzten

Freiheitsnische inszeniert: Um einer Polizeikontrolle zu entgehen, deaktiviert Dallas den Automatikmodus seines Taxis (Das fünfte Element, 34:20). Dies geschieht per Knopfdruck und nicht per Stimmbefehl.

Das gesamte Setting des Films *I, Robot* (2004) von Alex Proyas zielt auf die Ambivalenz aus Unheimlichem und Wunderbarem moderner Automaten. Kommissar Spooner (Will Smith) verfügt über einen vollautonomen Audi RSQ, der manuell gesteuert werden kann. Das oben offene Steuerrad mit seitlichen Joysticks ist wie im Firebird II ausfahrbar. Aktiviert wird es per Knopfdruck.

Obwohl das Fahrzeug mit hoher Geschwindigkeit durch einen Tunnel fährt, entschließt sich Spooner plötzlich, das Steuer selbst zu übernehmen. „Manual Driving“ bestätigt der Wagen mit einer weiblichen Stimme (I, Robot, 21:23). Seine Beifahrerin fragt entsetzt, ob er wirklich manuell fahren wolle. Kurz darauf gibt es fast einen Unfall. Bei hohen Geschwindigkeiten ist die automatische Steuerung also sicherer als die manuelle. Was Sicherheit bedeutet, hängt aber vom Kontext ab. Um sich vor Angreifern in Sicherheit bringen zu können, muss der Wagen manuell gesteuert werden (I, Robot, 50:46). Fluchtfahrzeug und autonomes Fahren widersprechen sich auch hier.

I, Robot ist bis heute der letzte Film, der autonomes Fahren zeigt. Dies kann im Zusammenhang mit den Roboterrennen des US-amerikanischen Militärs gesehen werden, die im selben Jahr starteten. Mit dem Ziel, zukünftig ein Drittel aller US-Militärfahrzeuge autonom fahren zu lassen, veranstaltete die Forschungsabteilung DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 2004 die erste *Grand Challenge*, ein Wüstenrennen autonomer Fahrzeuge. Aus dem zweiten Rennen 2005 ging ein VW Touareg namens Stanley als Sieger hervor. Er war im Artificial Intelligence Laboratory der Stanford University unter Leitung von Sebastian Thrun entwickelt worden, der 2008 die bekannte Flotte autonomer Fahrzeuge bei Google aufbaute.

Damit ist das fahrerlose Auto in der Realität angekommen. Lange Zeit inspirierte die Forschung den Film, nun scheint es umgekehrt zu sein: Der Film dient Forschungsteams als Referenz: So nahm an der *Urban Challenge* 2007 ein Fahrzeug mit dem Namen *Knight Rider* (Team University of Central Florida) teil.

3.21 Warum die Fernsteuerung weniger Angst macht

Kommen wir zum Schluss zur Fernsteuerung zurück, die im Film als die am wenigsten problematische Lösung inszeniert wird. *Batman* (1989) ruft sein Fahrzeug über ein Funkgerät herbei (Batman 01:08:55), James Bond steuert seinen Wagen in *Tomorrow never dies* (1997) über ein Touchpad auf einem frühen Smartphone (Tomorrow never dies, 51:24, 57:26).

Beide Autos sind nicht wirklich fahrerlos, der Fahrer befindet sich nur außerhalb des Wagens. Es gibt also eine Delokalisierung des Fahrerarbeitsplatzes, die Kontrolle wird aber nicht völlig an die Maschine übergeben. Aus diesem Grund taugen die Autos auch als Fluchtfahrzeuge. Von einem Auto gefahren zu werden, ist offenbar inkompatibel mit dem

Status eines Superhelden. Der körperliche Kontakt mit einem materiellen Objekt zum Steuern – hier der Fernbedienung – garantiert, dass die Handlungsmacht des Fahrer-Subjektes erhalten bleibt.

3.22 Zusammenfassung und Ausblick

Der Blick in die Bild- und Technikgeschichte des automatischen Fahrens hat gezeigt, dass technische und bildliche Innovationen sich in einem Wechselspiel entwickelt haben. Technische Prototypen, literarische Metaphern und bildliche Imaginationen stießen sich gegenseitig an, entwickelten sich aber nie synchron.

Die Fernsteuerungstechnik brachte das erste fremdgesteuerte Auto auf die Straße. Das erste wirklich selbst gesteuerte Fahrzeug entstand aber als literarische Imagination. Von 1935–1955 geht die Bildgeschichte der Technikgeschichte voran, animiert sie mit utopischen Autobahnpanoramen. Ende der 1960er-Jahre entwickelt sich eine von der Technikentwicklung relativ autonome filmische Bildgeschichte, die dann aber ab den 1980er-Jahren die Elektronifizierung des Fahrens direkt kommentiert. Ab 2005 scheint das autonome Fahren filmisch unattraktiv zu werden, da es an der Schwelle zur Gegenwart steht.

Die kulturelle Logik des selbst steuernden Automobils entfaltet sich über den gesamten Zeitraum hinweg zwischen Wunderbarem und Unheimlichem.

Kommen wir – um einen Ausblick zu wagen – zum Schluss auf den anfangs angesprochenen Widerspruch zwischen einem fahrgesteuerten und einem selbstfahrenden Auto zurück. Der Übergang von einer um den Selbstfahrer zentrierten automobilen Kultur zu einer Kultur des Sich-fahren-Lassens stellt eine große Herausforderung dar. Wie wird aus der *Freude am Fahren* (BMW) die Freude am *Gefahren werden*?

Die Automatisierung des Automobils ist nicht mit der Automatisierung anderer Objekte der Industriekultur des 20. Jahrhunderts vergleichbar. Ein wichtiger Effekt der Automatisierung lag in der Erleichterung körperlich mühsamer Tätigkeiten (Rolltreppe, Fahrstuhl, Waschmaschine). Auch wenn diese technischen Transformationen eine Umstellung der Wahrnehmung erforderten, kehrten sie die Logik der betroffenen Aktivitäten nicht diametral um.

Das Lenken eines Autos ist hingegen nicht nur eine mühevoll, langweilige, anstrengende und gefährliche Tätigkeit. Fahren macht auch Spaß. Gerade Risiken und Gefahren machen historisch wie auch aktuell für viele Autofahrer einen zentralen Reiz des Fahrens aus. Der Übergang zu fahrerlosen Automobilen stellt also einen kulturellen Sprung dar, er macht geradezu eine Neuerfindung des Automobils notwendig. Erinnern wir uns: Etymologisch und historisch setzt sich der Begriff Automobil aus *autos* (gr.) (selbst) und *mobilis* (lat.) (beweglich) zusammen. Auto-Mobil zu sein, bedeutet also selbstbeweglich zu sein. Ob mit diesem Selbst der Fahrer gemeint ist oder das Auto, bleibt dabei grundsätzlich offen. Deshalb ließe sich mit einigem Recht behaupten, dass das Auto mit dem autonomen Fahren erst wirklich automobil wird.

3.22.1 Bereitete uns Siri auf Iris vor?

Der Erfolg des autonomen Fahrzeugs der Zukunft hängt von einem Schlüsselement ab, der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Um die Jahrtausendwende bewertete das Kino die sprachliche Kommunikation zwischen Mensch und Maschine eher skeptisch. Akustischer Austausch wurde als störanfälliger und offener für Zweideutigkeiten dargestellt als haptische Kontakte.

Die Entfernung des Steuerrades stellt weiterhin ein Tabu dar. Es könnte sich aber zeigen, dass die in einem Smartphone im Jahr 2011 eingeführte Spracherkennungssoftware SIRI der Sprachschnittstelle im Auto den Weg bereitet. Eine kürzlich veröffentlichte Studie [41] machte deutlich, dass autonomen Fahrzeugen ein größeres Vertrauen entgegengebracht wird, wenn sie einen Namen, eine Stimme, ein Geschlecht bekommen. Das Auto bekam den Namen IRIS und eine weibliche Stimme, die den Nutzer über die Funktionsweise des Fahrzeugs informierte.

Einerseits brechen fahrerlose Autos in Bezug auf die Steuerung mit allen historischen Ritualen, andererseits sind sie geradezu prädestiniert, die Anthropomorphisierung des Automobils zu steigern. Schon heute behandeln wir unsere Autos wie lebendige Wesen und finden darin nichts Unheimliches, ließe sich in Analogie zu Sigmund Freuds Bemerkungen zum kindlichen Spiel mit Puppen sagen [8]. Die Verlebendigung muss sich also nicht im Unheimlichen des Kinos erschöpfen, sondern könnte auch mit dem Wunderbaren kompatibel sein. Ein gezähmtes, aber verlebendigtes Fahrzeug könnte sogar etwas von dem Märchenhaften [3] zurückerhalten, das dem Automobil mit der Massenmotorisierung abhanden gekommen ist.

Literatur

1. Americas Independent Electric Light and Power Companies, Anzeige, LIFE Magazine Vol. 40, Nr. 5, 30. Januar 1956, S. 8
2. Asimov, I.: Sally. In: Asimov, I.: Alle Roboter-Geschichten, S. 22–46. Bastei-Lübbe, Köln (2007)
3. Barthes, R.: Œuvres complètes. Tome II, Livres, textes, entretiens 1962–1967. Nouvelle édition revue, corrigée et présentée par Éric Marty. Seuil, Paris (2002)
4. Bel Geddes, N.: Horizons. Little, Brown, and Company, Boston (1932)
5. Bloch, E.: Das Prinzip Hoffnung. Band 2. Suhrkamp, Frankfurt am Main (1959)
6. Ceruzzi, Paul E.: Beyond the Limits, Flight Enters the Computer Age. The MIT Press, Cambridge und London (1989)
7. Espenschied, L.: Discussion of „A History of Some Foundations of Modern Radio-Electronic Technology“. Proceedings of the IRE, 47/47, Juli 1959, S. 1253–1258 (1959)
8. Freud, S.: Das Unheimliche. Texte zur Literatur. Fischer, Berlin (1963)
9. General Motors: Futurama, Broschüre zur Ausstellung, USA (1940)
10. General Motors: „An automatically guided automobile cruised along a one-mile check road at General Motors technical Center today...“ Pressemitteilung, USA (1953)
11. Gibson, G. W.: Why Don't We Have... CRASH-PROOF HIGHWAYS. Mechanix Illustrated, Juni 1953, S. 58–60 und 184 (1953)

12. Green, F.: Radio Control – Marvel of the Future. *Popular Science*, 106/3, S. 88–89 und 171–172 (1925)
13. Hammond, J. H., Purington E.S.: Rebuttal of the Discussion of „A History of Some Foundations of Modern Radio-Electronic Technology“, *Proceedings of the IRE*, Juli 1959, S. 1258–1268 (1959)
14. Heinlein, R. A.: *Methuselah's Children*. PAN Books, London [1941] (1963)
15. Huth, J. F., Levine, R. F.: *Knight Rider Legacy. The Unofficial Guide to the Knight Rider Universe*. Universe Star, Lincoln (2004)
16. Illing, W.: *Utopolis*. Der Bücherkreis, Berlin (1930)
17. Keller, D. H.: The Living Machine. *Wonder Stories*, Mai 1935, S. S. 1465–1511 (1935)
18. Kröger, F.: Fahrerlos und unfallfrei. Eine frühe automobile Technikutopie und ihre populkulturelle Bildgeschichte. In: Fraunholz, U., Woschech, A. (Hg.) *Technology Fiction, Technische Visionen und Utopien in der Hochmoderne*, S. 93–114. Transcript, Bielefeld (2012)
19. Lefebvre, H.: *Everyday Life in the Modern World*. Penguin, Harmondsworth [1941] (1968)
20. Mann, M.: The Car That Drives Itself. *Popular Science*, 172/5, S. 76 (1958)
21. Marchand, R.: The designers go to the Fair, II. Norman Bel Geddes, The General Motors 'Futurama', and the Visit to the Factory Transformed. In: Doordan, D. P. (Hg.) *Design history. An anthology*. S. 103–121. The MIT Press, Cambridge (1995)
22. McClintock, M.: *Street Traffic Control*. McGraw-Hill Book Company, New York (1925)
23. Meyer-Drawe, K.: Das Auto – ein gepanzertes Selbst. In: Winzen, M., Bilstein, J. (Hg.) *Ich bin mein Auto. Die maschinellen Ebenbilder des Menschen*, S. 102–113. Verlag der Buchhandlung Walther König, Köln (2001)
24. Mintz, S., Kellog, S. (Hg.): *Domestic revolutions. A social history of american family life*. The Free Press, New York (1988)
25. Morshed, A.: The Aesthetics of Ascension in Norman Bel Geddes's Futurama. *The Journal of the Society of Architectural Historians*, 63/1. S. 74–99 (2004)
26. Murtfeldt, E. W.: Highways of the future. *Popular Science*, 132/5, S. 27–29 und 118–119 (1938)
27. Norton, P. D.: Fighting Traffic. The Dawn of the Motor Age in the American City. The MIT Press, Cambridge (2008)
28. o. V.: "Driverless Auto, Guided by Radio, Navigates Street", *The Washington Herald*, 6. August 1921, S. 5
29. o. V.: "Phantom-Auto" will tour city, *The Milwaukee Sentinel*, 8. Dezember 1926, S. 4
30. o. V.: "Magic Car to demonstrate Safety", *The Herald Statesman*, 28. Juli 1936, S. 1
31. o. V.: "Robot" Car to Thread Way in Traffic Today, *Schenectady Gazette*, 24. Oktober 1936, S. 7
32. o. V.: Science: Radio Auto, in: *TIME*, 10. August 1925
33. o. V.: (Abbildung), *The Daily Ardmoreite*, 12. August 1921, S. 5
34. Phantastische Bibliothek Wetzlar (Hg.): *Verkehrssysteme der Zukunft. Studie im Auftrag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in der Helmholtz-Gemeinschaft, Institut für Verkehrsforschung (IVF), Wetzlar* (2005)
35. Rowsome Jr., F.: Educated Gas Pedal Keeps the Cops Away. *Popular Science*, 164/1, S. 166–169 und 264 (1954)
36. Rowsome Jr., F.: What It's Like to Drive an Auto-Pilot Car. *Popular Science*, 172/4, S. 105–107, 248, 250 (1958)
37. Siegel, G.: *Technologies of Accident. Forensic Media, Crash Analysis and the Redefinition of Progress*. Dissertation, University of North Carolina, Chapel Hill (2005)
38. Telotte, J. P.: *The mouse machine. Disney and technology*. University of Illinois Press, Urbana, Chicago (2008)
39. Todorov, T.: *Introduction à la littérature fantastique*. Editions du Seuil, Paris (1970)

40. Van Riper, A. B.: A Nation on Wheels. Films about Cars and Driving, 1948–1970. In: Van Riper, A. B. (Hg.): Learning from Mickey, Donald and Walt. Essays on Disney's Edutainment Films, S. 103–112. Mc Farland, Jefferson (2011)
41. Waytz, A., Heafner, J., Epley, N., The Mind in the Machine. Anthropomorphism Increases Trust in an Autonomous Vehicle. Journal of Experimental Social Psychology, 52, S. 113–117 (2014)
42. Wetmore, J. M.: Driving the Dream. The History and Motivations Behind 60 Years of Automated Highway Systems in America, Automotive History Review (2003)

Filmografie

The Safest Place	(1935)	Prod.: Jam Handy
Magic Highway U.S.A.	(1958)	R.: Ward Kimball
Key to the Future	(1956)	R.: Michael Kidd
The Love Bug	(1968)	R.: Robert Stevenson
The Car	(1977)	R.: Elliot Silverstein
Ein Käfer auf Extratour	(1973)	R.: Rudolf Zehetgruber
Duell	(1971)	R.: Steven Spielberg
Knight Rider	(1982–1986)	Prod.: Glen A. Larson
Christine	(1983)	R.: John Carpenter
Batman	(1989)	R.: Tim Burton
Total Recall	(1990)	R.: Paul Verhoeven
Demolition Man	(1993)	R.: Marco Brambilla
Tomorrow never dies	(1997)	R.: Roger Spottiswoode
Das fünfte Element	(1997)	R.: Luc Besson
The 6th Day	(2000)	R.: Roger Spottiswoode
Minority Report	(2002)	R.: Steven Spielberg
I, Robot	(2004)	R.: Alex Proyas

Patrick Lin

Content

4.1 Why ethics matters 70

4.1.1 Beyond crash-avoidance 71

4.1.2 Crash-optimization means targeting 72

4.1.3 Beyond harm 73

4.2 Scenarios that implicate ethics 74

4.2.1 The deer 74

4.2.2 Self-sacrifice 76

4.2.3 Ducking harm 77

4.2.4 Trolley problems 78

4.3 Next steps 80

4.3.1 Broader ethical issues 80

4.3.2 Conclusions 81

References 82

If motor vehicles are to be truly autonomous and able to operate responsibly on our roads, they will need to replicate – or do better than – the human decision-making process. But some decisions are more than just a mechanical application of traffic laws and plotting a safe path. They seem to require a sense of ethics, and this is a notoriously difficult capability to reduce into algorithms for a computer to follow.

This chapter will explain why ethics matters for autonomous road vehicles, looking at the most urgent area of their programming. Nearly all of this work is still in front of the

P. Lin (✉)
California Polytechnic State University, Philosophy Department, USA
palin@calpoly.edu

industry, which is to say that I will mainly raise the questions here and not presume to have any definitive answers at such an early stage of the technology.

A brief note about terminology

I will use “autonomous”, “self driving”, “driverless”, and “robot” interchangeably. These refer primarily to future vehicles that may have the ability to operate without human intervention for extended periods of time and to perform a broad range of actions. I will also use “cars” to refer loosely to all motor vehicles, from a motorcycle to a freight truck; those distinctions do not matter for the discussion here.

4.1 Why ethics matters

To start, let me offer a simple scenario that illustrates the need for ethics in autonomous cars. Imagine in some distant future, your autonomous car encounters this terrible choice: it must either swerve left and strike an eight-year old girl, or swerve right and strike an 80-year old grandmother [33]. Given the car’s velocity, either victim would surely be killed on impact. If you do not swerve, both victims will be struck and killed; so there is good reason to think that you ought to swerve one way or another. But what would be the ethically correct decision? If you were programming the self-driving car, how would you instruct it to behave if it ever encountered such a case, as rare as it may be?

Striking the grandmother could be the lesser evil, at least to some eyes. The thinking is that the girl still has her entire life in front of her – a first love, a family of her own, a career, and other adventures and happiness – while the grandmother has already had a full life and her fair share of experiences. Further, the little girl is a moral innocent, more so than just about any adult. We might agree that the grandmother has a right to life and as valuable a life as the little girl’s; but nevertheless, there are reasons that seem to weigh in favor of saving the little girl over the grandmother, if an accident is unavoidable. Even the grandmother may insist on her own sacrifice, if she were given the chance to choose.

But either choice is ethically incorrect, at least according to the relevant professional codes of ethics. Among its many pledges, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), for instance, commits itself and its 430,000+ members “to treat fairly all persons and to not engage in acts of discrimination based on race, religion, gender, disability, age, national origin, sexual orientation, gender identity, or gender expression” [23]. Therefore, to treat individuals differently on the basis of their age, when age is not a relevant factor, seems to be exactly the kind of discrimination the IEEE prohibits [18, 33].

Age does not appear to be a relevant factor in our scenario as it might be in, say, casting a young actor to play a child’s character in a movie. In that movie scenario, it would be appropriate to reject adult actors for the role. Anyway, a reason to discriminate does not necessarily justify that discrimination, since some reasons may be illegitimate. Even if we point to the disparity of life experiences between the old and the young, that difference isn’t automatically an appropriate basis for different treatment.

Discriminating on the basis of age in our crash scenario would seem to be the same evil as discriminating on the basis of race, religion, gender, disability, national origin, and so on, even if we can invent reasons to prefer one such group over another. In Germany – home to many influential automotive companies that are working to develop self-driving technologies – the right to life and human dignity is basic and set forth in the first two articles of the very first chapter in the nation’s constitution [9]. So it is difficult to see how German law could even allow a company to create a product that is capable of making such a horrific and apparently illegal choice. The United States similarly strives to offer equal protection to all persons, such as stipulated in the fourteenth amendment of its constitution.

If we cannot ethically choose a path forward, then what ought to be done? One solution is to refuse to make a swerve decision, allowing both victims to be struck; but this seems much worse than having only one victim die, even if we are prejudiced against her. Anyway, we can force a decision by modifying the scenario: assume that 10 or 100 other pedestrians would die, if the car continued forward; and swerving would again result in only a single death.

Another solution could be to arbitrarily and unpredictably choose a path, without prejudice to either person [34]. But this too seems ethically troubling, in that we are choosing between lives without any deliberation at all – to leave it to chance, when there are potentially some reasons to prefer one over the other, as distasteful and uncomfortable as those reasons may be. This is a dilemma that is not easily solvable and therefore points to a need for ethics in developing autonomous cars.

4.1.1 Beyond crash-avoidance

Many readers may object right away that the dilemma above (and others that follow) will never occur with autonomous cars. It may be suggested that future cars need not confront hard ethical choices, that simply stopping the car or handing control back to the human operator is the easy path around ethics. But I will contend here that braking and relinquishing control will not always be enough. Those solutions may be the best we have today, but if automated cars are to ever operate more broadly outside of limited highway environments, they will need more response-options.

Current research already makes this case as a matter of physics [12, 13], but we can also make a case from commonsense. Many ordinary scenarios exist today in which braking is not the best or safest move, whether by human or self-driving car. A wet road or a tailgater, for instance, may make it dangerous to slam the brakes, as opposed to some other action such as steering around the obstacle or simply through it, if it is a small object. Today, the most advanced self-driving cars cannot detect small objects such as squirrels [7]; therefore, they presumably cannot also detect squirrel-sized rocks, potholes, kittens, and other small but consequential hazards can cause equipment failure, such as tire blowouts or sensor errors, or deviations from a safe path.

In these and many other cases, there may not be enough time to hand control back to the driver. Some simulation experiments suggest that human drivers need up to 40 seconds to regain situation awareness, depending on the distracting activity, e. g., reading or napping – far longer than the 1–2 seconds of reaction time required for typical accident scenarios [38, 18]. This means that the car must be responsible for making decisions when it is unreasonable to expect a timely transfer of control back to the human, and again braking might not be the most responsible action.

One possible reply is that, while imperfect, braking could successfully avoid the majority of emergency situations a robot car may find itself in, even if it regrettably makes things worse in a small number of cases. The benefits far outweigh the risks, presumably, and the numbers speak for themselves. Or do they? I will discuss the dangers of morality by math throughout this chapter.

Braking and other responses in the service of crash-avoidance won't be enough, because crash-avoidance is not enough. Some accidents are unavoidable – such as when an animal or pedestrian darts out in front of your moving car – and therefore autonomous cars will need to engage in *crash-optimization* as well. Optimizing crashes means to choose the course of action that will likely lead to the least amount of harm, and this could mean a forced choice between two evils, for instance, choosing to strike either the eight-year old girl or the 80-year old grandmother in my first scenario above.

4.1.2 Crash-optimization means targeting

There may be reasons, by the way, to prefer choosing to run over the eight-year old girl that I have not yet mentioned. If the autonomous car were most interested in protecting its own occupants, then it would make sense to choose a collision with the lightest object possible (the girl). If the choice were between two vehicles, then the car should be programmed to prefer striking a lighter vehicle (such as a Mini Cooper or motorcycle) than a heavier one (such as a sports utility vehicle (SUV) or truck) in an adjacent lane [18, 34].

On the other hand, if the car were charged with protecting other drivers and pedestrians over its own occupants – not an unreasonable imperative – then it should be programmed to prefer a collision with the heavier vehicle than the lighter one. If vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communications are rolled out (or V2X to refer to both), or if an autonomous car can identify the specific models of other cars on the road, then it seems to make sense to collide with a safer vehicle (such as a Volvo SUV that has a reputation for safety) over a car not known for crash-safety (such as a Ford Pinto that's prone to exploding upon impact).

This strategy may be both legally and ethically better than the previous one of jealously protecting the car's own occupants. It could minimize lawsuits, because any injury to others would be less severe. Also, because the driver is the one who introduced the risk to society – operating an autonomous vehicle on public roads – the driver may be legally obligated,

or at least morally obligated, to absorb the brunt of any harm, at least when squared off against pedestrians, bicycles, and perhaps lighter vehicles.

The ethical point here, however, is that no matter which strategy is adopted by an original equipment manufacturer (OEM), i. e., auto manufacturer, programming a car to choose a collision with any particular kind of object over another very much resembles a *targeting* algorithm [33]. Somewhat related to the military sense of selecting targets, crash-optimization algorithms may involve the deliberate and systematic discrimination of, say, large vehicles or Volvos to collide into. The owners or operators of these targeted vehicles bear this burden through no fault of their own, other than perhaps that they care about safety or need an SUV to transport a large family.

4.1.3 Beyond harm

The problem is starkly highlighted by the following scenario [15, 16, 17, 34]: Again, imagine that an autonomous car is facing an imminent crash, but it could select one of two targets in adjacent lanes to swerve into: either a motorcyclist who is wearing a helmet, or a motorcyclist who is not. It probably doesn't matter much to the safety of the car itself or its occupants whether the motorcyclist is wearing a helmet; the impact of a helmet into a car window doesn't introduce that much more risk that the autonomous car should want to avoid it over anything else. But it matters a lot to the motorcyclist whether s/he is wearing a helmet: the one without a helmet would probably not survive such a collision. Therefore, in this dreadful scenario, it seems reasonable to program a good autonomous car to swerve into the motorcyclist with the helmet.

But how well is justice and public policy served by this crash-optimization design? Motorcyclists who wear helmets are essentially being penalized and discriminated against for their responsible decision to wear a helmet. This may encourage some motorcyclists to not wear helmets, in order to avoid targeting by autonomous cars. Likewise, in the previous scenario, sales may decline for automotive brands known for safety, such as Volvo and Mercedes Benz, insofar as customers want to avoid being the preferred targets of crash-optimization systems.

Some readers may want to argue that the motorcyclist without a helmet ought to be targeted, for instance, because he has acted recklessly and therefore is more deserving of harm. Even if that's the correct design, notice that we are again moving beyond harm in making crash-optimization decisions. We're still talking about justice and other such ethical considerations, and that's the point: it's not just a numbers game.

Programmers in such scenarios, as rare as they may be, would need to design cost-functions – algorithms that assign and calculate the expected costs of various possible options, selecting the one with the lowest costs – that potentially determine who gets to live and who gets to die. And this is fundamentally an ethics problem, one that demands much more care and transparency in reasoning than seems currently offered. Indeed, it is difficult to imagine a weightier and more profoundly serious decision

a programmer would ever have to make. Yet, there is little discussion about this core issue to date.

4.2 Scenarios that implicate ethics

In addition to the ones posited above, there are many actual and hypothetical scenarios that involve judgments about ethics. I will describe some here to show how ordinary assumptions in ethics can be challenged.

4.2.1 The deer

Though difficult to quantify due to inconsistent and under-reporting, experts estimate that more than a million car accidents per year in the US are caused by deer [6, 48]. Many, if not most, drivers have been startled by an unexpected animal on the road, a dangerous situation for both parties. Deconstructing a typical accident, or near-accident, involving an animal illustrates the complexity of the decisions facing the driver [30]. While all this happens within seconds – not enough time for careful deliberations by human drivers – an autonomous car could have the virtue of a (presumably) thoughtful decision-making script to very quickly react in an optimal way. If it is able to account for the many variables, then it ought to, for the most informed decision possible.

First, suppose an object appears on the road directly in front of a car in autonomous mode. Is there time to reasonably hand control back to the human behind the wheel? (Probably not.) If not, is there time to stop the car? Would the car need to brake hard, or would moderate braking be sufficient? The decision to brake depends, again, on road conditions and whether a tailgater (such as a big-rig truck) is behind you, including its speed to determine the severity of a possible rear-end collision.

Second, what is the object? Is it an animal, a person, or something else? If it is an animal, are some animals permissible to run over? It may be safer to continue ahead and strike a squirrel, for instance, than to violently swerve around it and risk losing control of the car. However, larger animals, such as deer and cows, are more likely to cause serious damage to the car and injuries to occupants than a spun-out car. Other animals, still, have special places in our hearts and should be avoided if possible, such as pet dogs and cats.

Third, if the car should get out of the way – either in conjunction with braking or not – should it swerve to the left or to the right? In the US and other nations in which drivers must stay on the right side of the road, turning to the right may mean driving off the road, potentially into a ditch or a tree. Not only could harm to the car and occupants be likely, but it also matters how many occupants are in the car. The decision to drive into an embankment seems different when only one adult driver is in the car, than when several children are inside too.

On the other hand, turning to the left may mean driving into an opposite lane, potentially into a head-on collision with incoming vehicles. If such a collision is unavoidable, then it

matters what kind of vehicle we would crash into (e. g., is it a compact car or SUV?), how heavy incoming traffic is (e. g., would more than one vehicle be involved?), how many persons may be involved (e. g., are there children in the other car?). Of course, here we are assuming perfect sensing and V2X communications that can help answer these questions. If we cannot answer the questions, then we face a possibly large unknown risk, which makes driving into incoming traffic perhaps the worst option available.

Other factors relevant to the decision-points above include: the road-shoulder type (paved, gravel, none, etc.), the condition of the car's tires and brakes, whether the car's occupants are seat-belted, whether the car is transporting dangerous cargo that could spill or explode, proximity to hospital or emergency rescue, damage to property such as houses and buildings, and more. These variables influence the probability of an accident as well as expected harm, both of which are needed in selecting the best course of action.

From this short analysis of a typical crash (or possible crash) with an animal, we can already see a daunting number of factors to account for. Sensing technologies today cannot answer some or many of the questions above, but it is already unclear that braking should be the safest default option – as a proxy for the most ethical option – given these uncertain conditions, all things considered. Automated cars today can already detect whether there is oncoming traffic in the opposite lane. Therefore, it is at least possible that they can be programmed to maneuver slightly into the incoming lane under some conditions, e. g., when there are no incoming cars and when it may be dangerous to slam on the brakes.

Whether or not sensing technologies will improve enough to deliver answers to our questions above, a programmer or OEM would still need to assign costs or weights to various actions and objects as best as they can. Yet these values are not intrinsic to or discoverable by science or engineering. Values are something that we humans must stipulate and ideally agree upon. In constructing algorithms to control an autonomous car, ethics is already implied in the design process. Any decision that involves a tradeoff such as to strike object *x* instead of object *y* requires a value-judgment about the wisdom of the tradeoff, that is, the relative weights of *x* and *y*. And the design process can be made better by recognizing the ethical implications and by engaging the broader community to ensure that those values are represented correctly or at least transparently. Working in a moral bubble is less likely to deliver results that are acceptable to society.

Again, in a real-world accident today, a human driver usually has neither the time nor the information needed to make the most ethical or least harmful decisions. A person who is startled by a small animal on an otherwise uneventful drive may very well react poorly. He might drive into oncoming traffic and kill a family, or oversteer into a ditch and to his own death. Neither of these results, however, is likely to lead to criminal prosecution by themselves, since there was no forethought, malice, negligence, or bad intent in making a forced, split-second reaction. But the programmer and OEM do not operate under the sanctuary of reasonable instincts; they make potentially life-and-death decisions under no truly urgent time-constraint and therefore incur the responsibility of making better decisions than human drivers reacting reflexively in surprise situations.

4.2.2 Self-sacrifice

As we can see, real-world accidents can be very complicated. In philosophy and ethics, a familiar method is to simplify the issues through hypothetical scenarios, otherwise known as “thought-experiments.” This is similar to everyday science experiments in which researchers create unusual conditions to isolate and test desired variables, such as sending spiders into outer space to see how micro-gravity affects their ability to spin webs. It is not a good objection to those experiments to say that no spiders exist naturally in space; that misses the point of the experiment.

Likewise, it is no objection to our hypothetical examples that they are outlandish and unlikely to happen in the real world, such as a car that can distinguish an eight-year old from an 80-year old (though with improving biometrics, facial recognition technologies, and linked databases, this doesn’t seem impossible). Our thought-experiments are still useful in drawing out certain ethical intuitions and principles we want to test.

With that understanding, we can devise hypothetical scenarios to see that reasonable ethical principles can lead to controversial results in the context of autonomous driving. Digging into a standard philosophical toolbox for help with ethical dilemmas, one of the first principles we might reach for is consequentialism: that the right thing to do is whatever leads to the best results, especially in quantified terms [44]. As it applies here, consequentialism suggests that we should strive to minimize harm and maximize whatever it is that matters, such as, the number of happy lives.

In this thought-experiment, your future autonomous car is driving you on a narrow road, alongside a cliff. No one and no technology could foresee that a school bus with 28 children would appear around the corner, partially in your lane [29, 36]. Your car calculates that crash is imminent; given the velocities and distance, there is no possible action that can avoid harming you. What should your robot car do?

A good, standard-issue consequentialist would want to optimize results, that is, maximize the number of happy lives and minimize harm. Assuming that all lives in this scenario are more or less equally happy – for instance, there’s no super-happy or super-depressed person, and no very important person who has unusual influence over the welfare of others – they would each count for about the same in our moral calculation. As you like, we may either ignore or account for the issue of whether there is extra value in the life of innocent child who has more years of happiness ahead of her than an average adult; that doesn’t matter much for this scenario.

The robot car’s two main choices seem to be: (1) to slam on the brakes and crash into the bus, risking everyone’s lives, or (2) to drive off the cliff, sparing the lives of everyone on the bus. Performing a quick expected-utility calculation, if the odds of death to each person (including the adult bus driver) in the accident averaged more than one in 30, then colliding into the bus would yield the expected result of more than one death, up to all 30 persons. (Let’s say the actual odds are one in three, which gives an expected result of 10 deaths.) If driving off a cliff meant certain death, or the odds of one in one, then the expected result of that would be exactly one death (your own) and no more. The right consequen-

tialist decision for the robot car – if all we care about is maximizing lives and minimizing deaths – is apparently to drive off the cliff and sacrifice the driver, since it is better that only one person should die rather than more than one, especially 10 or all 30 persons.

This decision would likely be different if, instead of a school bus, your robot car were about to collide with another passenger car carrying only one person. Given the same average odds of death, one in three, the expected number of deaths in a collision would only be 0.67, while the expected number of deaths in driving off a cliff remains at one. In that case, the right consequentialist decision would be to allow the accident to occur, as long as the average odds of death are less than one in two. If, instead of another vehicle, your car were about to collide with a deer, then the decision to stay on the road, despite an ensuing accident, would be even more obvious insofar as we value a deer's life less than a human life.

Back to the school-bus scenario, programming an autonomous car with a consequentialist framework for ethics would seem to imply your sacrifice. But what is most striking about this case might not even be your death or the moral mathematics: if you were in a manually driven car today, driving off the cliff might still be the most ethical choice you could make, so perhaps you would choose certain death anyway, had you the time to consider the options. However, it is one thing for you to willingly make that decision of sacrifice yourself, and quite another matter for a machine to make that decision without your consent or foreknowledge that self-sacrifice was even a possibility. That is, there is an astonishing lack of transparency and therefore consent in such a grave decision, one of the most important that can be made about one's life – perhaps noble if voluntary, but criminal if not.

Thus, reasonable ethical principles – e.g., aiming to save the greatest number of lives – can be stressed in the context of autonomous driving. An operator of an autonomous vehicle, rightly or not, may very well value his own life over that of everyone else's, even that of 29 others; or he may even explicitly reject consequentialism. Even if consequentialism is the best ethical theory and the car's moral calculations are correct, the problem may not be with the ethics but with a lack of discussion about ethics. Industry, therefore, may do well to have such a discussion and set expectations with the public. Users – and news headlines – may likely be more forgiving if it is explained in advance that self-sacrifice may be a justified feature, not a bug.

4.2.3 Ducking harm

Other ethical principles can create dilemmas, too. It is generally uncontroversial that, if you can easily avoid harm to yourself, then you should do it. Indeed, it may be morally required that you save yourself when possible, if your life is intrinsically valuable or worth protecting; and it is at least extrinsically valuable if you had a dependent family. Auto manufacturers or OEMs seem to take this principle for granted as well: if an autonomous car can easily avoid a crash, e.g., by braking or swerving, then it should. No ethical problem here – or is there?

In another thought-experiment [15, 18, 33], your robotic car is stopped at an intersection and waits patiently for the children who are crossing in front of you. Your car detects a pickup truck coming up behind you, about to cause a rear-end collision with you. The crash would likely damage your car to some degree and perhaps cause minor injury to you, such as whiplash, but certainly not death. To avoid this harm, your car is programmed to dash out of the way, if it can do so safely. In this case, your car can easily turn right at the intersection and avoid the rear-end collision. It follows this programming, but in doing so, it clears a path for the truck to continue through the intersection, killing a couple children and seriously injuring others.

Was this the correct way to program an autonomous car? In most cases of an impending rear-end collision, probably yes. But in this particular case, the design decision meant saving you from minor injury at the expense of serious injury and death of several children, and this hardly seems to be the right choice. In an important respect, you (or the car) are responsible for their deaths: you (or the car) killed the children by removing an obstruction that prevented harm from falling upon them, just as you would be responsible for a person's death if you removed a shield he was holding in front of a stream of gunfire. And killing innocent people has legal and moral ramifications.

As with the self-sacrifice scenario above, it might be that in the same situation today, in a human-driven car, you would make the same decision to save yourself from injury, if you were to see a fast-approaching vehicle about to slam into you. That is, the result might not change if a human made the on-the-spot decision. But, again, it is one thing to make such a judgment in the panic of the moment, but another less forgivable thing for a programmer – far removed from the scene and a year or more in advance – to create a cost-function that resulted in these deaths. Either the programmer did so deliberately, or she did it unintentionally, unaware that this was a possibility. If the former, then this could be construed as premeditated homicide; and if the latter, gross negligence.

Either way is very bad for the programmer and perhaps an inherent risk in the business, when one attempts to replicate human decision-making in a broad range of dynamic scenarios. Sometimes, an autonomous car may be faced with a “no-win” scenario, putting the programmer in a difficult but all too real position. To mitigate this risk, industry may do well to set expectations not only with users but also with broader society, educating them that they could also become victims even if not operating or in a robot car, and that perhaps this is justified by a greater public or overall good.

4.2.4 Trolley problems

One of the most iconic thought-experiments in ethics is the trolley problem [4, 8, 11, 47], and this is one that may now occur in the real world, if autonomous vehicles come to be. Indeed, driverless trains are already operating in dozens of cities worldwide and could bring this scene to life [24]. The classical dilemma involves a runaway trolley (or train) that is about to run over and kill five unaware people standing on the tracks. Looking at the scene

from the outside, you find yourself standing next to a switch: if you pull the switch, you can shunt the train to a right-hand set of tracks, thereby saving the five individuals on the track. Unfortunately, there is one person standing on the right-hand set of tracks who would then be killed. What is the right decision?

The “correct” decision continues to be a subject of much debate in philosophy. Both answers seem reasonable and defensible. A consequentialist might justify switching the tracks to save five people, even at the regrettable expense of one. But a non-consequentialist, someone who considers more than just the math or results, might object on the grounds that switching tracks constitutes an act of killing (the one person), while doing nothing is merely allowing someone to die (the five individuals); and that it is morally and legally worse to kill than to let die.

Killing implies that you are directly responsible for a person’s death: had you not done what you did, the person would have lived. Letting die, however, involves much less responsibility on your part, if any, since some causal process was already underway that was not initiated or otherwise controlled by you. The question of whether it is worse to kill than to let die is also subject to debate in philosophy. But let us bracket that for the moment, as a final answer is not necessary for our discussion, only that it is reasonable to believe that proposition.

Adapting the trolley problem to the technology at hand, let us suppose that you are driving an autonomous car in manual mode; you are in control. Either intentionally or not – you could be homicidal or simply inattentive – you are about to run over and kill five pedestrians. Your car’s crash-avoidance system detects the possible accident and activates, forcibly taking control of the car from your hands. To avoid this disaster, it swerves in the only direction it can, let’s say to the right. But on the right is a single pedestrian who is unfortunately killed.

Was this the right decision for your car to make? Again, a consequentialist would say yes: it is better that only one person dies than five. But a non-consequentialist might appeal to a moral distinction between killing and letting die, and this matters to OEMs for liability reasons. If the car does not wrestle control from the human driver, then it (and the OEM) would perhaps not be responsible for the deaths of the five pedestrians while you were driving the car; it is merely letting those victims die. But if the car does take control and make a decision that results in the death of a person, then it (and the OEM) becomes responsible for killing a person.

As with the trolley problem, either choice seems defensible. Results do matter, so it is not ridiculous to think that the car should be programmed to act and save lives, even at the expense of a fewer number of lives. Yet it also seems reasonable to think that killing is worse than letting die, especially in the eyes of the law. What I want to highlight here is not so much the answer but the process of deliberation that points us toward one answer over another. To the extent that there could be many acceptable answers to any given ethical dilemma, how well one answer can be defended is crucial toward supporting that answer over others.

Industry again would do well to set expectations by debating and explaining in advance its reasoning behind key algorithms that could result in life or death. Transparency, or showing one’s math, is an important part of doing ethics, not just the answer itself.

4.3 Next steps

Notice that the ethical issues discussed in this paper do not depend on technology errors, poor maintenance, improper servicing, security vulnerabilities, or other failings – and all those will occur too. No complex technology we have created has been infallible. Even industries with money directly at stake have not solved this problem. For instance, bank ATMs continue to make headlines when they hemorrhage cash – tens of thousands of dollars more than the account holder actually has – because of software glitches alone [2, 10], never mind hacking. And just about every computing device we have created has been hacked or is hackable, including neural implants and military systems [3, 28].

These vulnerabilities and errors certainly can cause harm in the context of autonomous cars, and it would be unethically irresponsible to not safeguard against them where we can. Putting these technology issues aside and even assuming that perfect technology is available, there are still many other safety and ethical questions to worry about, such as the programming issues above.

4.3.1 Broader ethical issues

But programming is only one of many areas to reflect upon as society begins to adopt autonomous driving technologies. Assigning legal and moral responsibility for crashes is a popular topic already [1, 14, 20, 22, 49, 51]. Here are a few others, as part of a much longer list of possible questions:

Does it matter to ethics if a car is publicly owned, for instance, a city bus or fire truck? The owner of a robot car may reasonably expect that its property “owes allegiance” to the owner and should value his or her life more than anonymous pedestrians and drivers. But a publicly owned automated vehicle might not have that obligation, and this can change moral calculations. Even for privately owned autonomous vehicles, the occupants arguably should bear more or all of the risk, since they are the ones introducing the machine into public spaces in the first place.

Do robot cars present an existential threat to the insurance industry? Some believe that ultra-safe cars that can avoid most or all accidents will mean that many insurance companies will go bankrupt, since there would be no or very little risk to insure against [40, 52]. But things could go the other way too: We could see *mega*-accidents as cars are networked together and vulnerable to wireless hacking – something like the stock market’s “flash crash” in 2010 [5]. What can the insurance industry do to protect itself while not getting in the way of the technology, which holds immense benefits?

How susceptible would robot cars be to hacking? So far, just about every computing device we have created has been hacked. If authorities and owners (e.g., rental car company) are able to remotely take control of a car – which is reportedly under development for law enforcement in the European Union [50] – this offers an easy path for cyber-carjackers. If under attack, whether a hijacking or ordinary break-in, what should the car do: speed

away, alert the police, remain at the crime scene to preserve evidence, or maybe defend itself?

For a future suite of in-car apps, as well as sensors and persistent GPS/tracking, can we safeguard personal information, or do we resign ourselves to a world with disappearing privacy rights [27]? To the extent that online services bring online advertising, we could see new, insidious advertising schemes that may allow third-party advertisers to have some influence on the autonomous car's route selection, e.g., steering the car past their businesses [32].

What kinds of abuse might we see with autonomous cars? If the cars drive too conservatively, they may become a traffic hazard or trigger road-rage in human drivers with less patience [26, 42]. If the crash-avoidance system of a robot car is generally known, then other drivers may be tempted to "game" it, e.g., by cutting in front of it, knowing that the automated car will slow down or swerve to avoid an accident. If those cars can safely drive us home in a fully-auto mode, that may encourage a culture of more alcohol consumption, since we won't need to worry so much about drunk-driving.

More distant concerns include: How will law-abiding robot cars affect city revenue, which often depends on traffic fines imposed against law-breaking human drivers? Inasmuch as many organ transplants come from car-accident victims, how will society manage a declining and already insufficient supply of donated organs [41]?

Older-model autonomous cars may be unable to communicate with later models or future road infrastructure. How do we get those legacy models – which may be less safe, in addition to incompatible with newer technology – off the roads [45]? Since 2009, Microsoft has been trying to kill off its Windows XP operating system [39], a much less expensive investment than an autonomous car; but many users still refuse to relinquish it, including for critical military systems [37, 46]. This is a great security risk since Microsoft will no longer offer software patches for the operating system.

4.3.2 Conclusions

We don't really know what our robot-car future will look like, but we can already see that much work needs to be done. Part of the problem is our lack of imagination. Technology policy expert Peter W. Singer observed, "We are still at the 'horseless carriage' stage of this technology, describing these technologies as what they are not, rather than wrestling with what they truly are" [43].

As it applies here, robots aren't merely replacing human drivers, just as human drivers in the first automobiles weren't simply replacing horses: that would like mistaking electricity as merely a replacement for candles. The impact of automating transportation will change society in radical ways, and technology seems to be accelerating. As Singer puts it, "Yes, Moore's Law is operative, but so is Murphy's Law" [43]. When technology goes wrong – and it will – thinking in advance about ethical design and policies can help guide us responsibility into the unknown.

In future autonomous cars, crash-avoidance features alone won't be enough. An accident may be unavoidable as a matter of physics [12, 13], especially as autonomous cars make their way onto city streets [19, 21, 25], a more dynamic environment than highways. It also could be too dangerous to slam on the brakes, or not enough time to hand control back to the unaware human driver, assuming there's a human in the vehicle at all. Technology errors, misaligned sensors, malicious actors, bad weather, and bad luck can also contribute to imminent collisions. Therefore, robot cars will also need to have crash-optimization strategies that are thoughtful about ethics.

If ethics is ignored and the robotic car behaves badly, a powerful case could be made that auto manufacturers were negligent in the design of their product, and that opens them up to tremendous legal liability, should such an event happen. Today, we see activists campaigning against "killer" military robots that don't yet exist, partly on the grounds that machines should never be empowered to make life-and-death decisions [31, 35]. It's not outside the realm of possibility to think that the same precautionary backlash won't happen to the autonomous car industry, if industry doesn't appear to be taking ethics seriously.

The larger challenge, though, isn't just about thinking through ethical dilemmas. It's also about setting accurate expectations with users and the general public who might find themselves surprised in bad ways by autonomous cars; and expectations matter for market acceptance and adoption. Whatever answer to an ethical dilemma that industry might lean towards will not be satisfying to everyone. Ethics and expectations are challenges common to all automotive manufacturers and tier-one suppliers who want to play in this emerging field, not just particular companies.

Automated cars promise great benefits and unintended effects that are difficult to predict, and the technology is coming either way. Change is inescapable and not necessarily a bad thing in itself. But major disruptions and new harms should be anticipated and avoided where possible. That is the role of ethics in innovation policy: it can pave the way for a better future while enabling beneficial technologies. Without looking at ethics, we are driving with one eye closed.

References

1. Anderson, J., Kalra, N., Stanley, K., Sorensen, P., Samaras, C., Oluwatola, O.: Autonomous vehicle technology: a guide for policymakers. Report by RAND Corporation. http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-1.html (2014). Accessed 8 July 2014
2. Associated Press. ATM 'glitch' gives \$37,000 to lucky homeless man. Daily Mail. <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2596977/ATM-glitch-gives-OVER-37-000-homeless-man-cash-requested-140.html> (2014). Accessed 8 July 2014
3. Baldor, L.: China hacked the Pentagon to get weapons data. Talking Points Memo. <http://talkingpointsmemo.com/news/china-hacked-the-pentagon-to-get-weapons-programs-data> (2013). Accessed 8 July 2014
4. Cathcart, T.: *The Trolley Problem, or Would You Throw the Fat Guy Off the Bridge?* Workman Publishing Company, New York (2013)

5. Commodity Futures Trading Commission and the Securities and Exchange Commission: Findings regarding the market events of May 6, 2010. CFTC and SEC, Washington DC. <http://www.sec.gov/news/studies/2010/marketevents-report.pdf> (2010). Accessed 8 July 2014
6. Curtis, P. and Hedlund, J.: Reducing deer-vehicle crashes. Report funded by the Insurance Institute for Highway Safety. Cornell University, Ithaca. http://wildlifecontrol.info/pubs/Documents/Deer/Deer-Vehicle_factsheet1.pdf (2005). Accessed 8 July 2014
7. Davies, A.: Avoiding squirrels and other things Google's robot car can't do. *Wired*. <http://www.wired.com/2014/05/google-self-driving-car-can-cant/> (2014). Accessed 8 July 2014
8. Edmonds, D.: *Would You Kill the Fat Man? The Trolley Problem and What Your Answer Tells Us About Right and Wrong*. Princeton University Press, Princeton (2014)
9. Federal Ministry of Justice and Consumer Protection: Basic Law for the Federal Republic of Germany. http://www.gesetze-im-internet.de/englisch_gg/englisch_gg.html (2014). Accessed 8 July 2014
10. Floro, Z.: Man goes on a casino bender after an ATM let him take out unlimited cash. *Business Insider*. <http://www.businessinsider.com/atm-gives-unlimited-cash-2012-6> (2012). Accessed 8 July 2014
11. Foot, P.: The problem of abortion and the doctrine of the double effect. *Oxford Review* 5, 5–15 (1967)
12. Fraichard, T.: Will the driver seat ever be empty? Report funded by Inria. <http://hal.inria.fr/hal-00965176> (2014). Accessed 8 July 2014
13. Fraichard, T., and Asama, H.: Inevitable collision states: a step towards safer robots? *Advanced Robotics* 18(10), 1001–1024 (2004)
14. Garza, A.: 'Look Ma, no hands!': wrinkles and wrecks in the age of autonomous vehicles. *New England Law Review* 46(3), 581–616 (2012)
15. Goodall, N.J.: Autonomous car ethics. Interview with CBC radio. <http://www.cbc.ca/spark/blog/2014/04/13/autonomous-car-ethics/> (2014). Accessed 8 July 2014
16. Goodall, N. J.: Machine ethics and automated vehicles. In: Meyer, G. and Beiker, S. (eds.) *Road Vehicle Automation*. Springer, Cham (2014)
17. Goodall, N. J.: Ethical decision making during automated vehicle crashes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (forthcoming)
18. Goodall, N. J.: Vehicle automation and the duty to act. In: *Proceedings of the 21st World Congress on Intelligent Transport Systems*, 7–11 September 2014, Detroit, Michigan (forthcoming)
19. Google: The latest chapter for the self-driving car: mastering city street driving. <http://googleblog.blogspot.co.at/2014/04/the-latest-chapter-for-self-driving-car.html> (2014). Accessed 8 July 2014
20. Gurney, J.: Sue my car, not me: products liability and accidents involving autonomous vehicles. *Journal of Law, Technology and Policy* 2, 247–277 (2013)
21. Hern, A.: Self-driving cars face a long and winding road to success. *The Guardian*. <http://www.theguardian.com/technology/2014/may/28/self-driving-cars-google-success> (2014). Accessed 8 July 2014
22. Hevelke, A. and Nida-Rumelin, J.: Responsibility for crashes of autonomous vehicles: an ethical analysis. *Science and Engineering Ethics* (2014). doi: 10.1007/s11948-014-9565-5
23. IEEE: IEEE code of ethics. <http://www.ieee.org/about/corporate/governance/p7-8.html> (2014). Accessed 8 July 2014
24. International Association of Public Transport: Observatory of automated metros. <http://metroautomation.org/> (2014). Accessed 8 July 2014
25. Jaffe, E.: The first look at how Google's self-driving car handles city streets. *The Atlantic/CityLab*. <http://www.citylab.com/tech/2014/04/first-look-how-googles-self-driving-car-handles-city-streets/8977/> (2014). Accessed 8 July 2014

26. KPMG: Self-driving cars: are we ready? Report by KPMG. KPMG, Chicago. <http://www.kpmg.com/US/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-are-we-ready.pdf> (2013). Accessed 8 July 2014
27. Lee, T.: Self-driving cars are a privacy nightmare. And it's totally worth it. The Washington Post. <http://www.washingtonpost.com/blogs/wonkblog/wp/2013/05/21/self-driving-cars-are-a-privacy-nightmare-and-its-totally-worth-it/> (2013). Accessed 8 July 2014
28. Leggett, H.: The new hacking frontier: your brain? Wired. <http://www.wired.com/2009/07/neurosecurity/> (2009). Accessed 8 July 2014
29. Lin, P.: The ethics of saving lives with autonomous cars is far murkier than you think. Wired. <http://www.wired.com/2013/07/the-surprising-ethics-of-robot-cars/> (2013). Accessed 8 July 2014
30. Lin, P.: The ethics of autonomous cars. The Atlantic. <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2013/10/the-ethics-of-autonomous-cars/280360/> (2013). Accessed 8 July 2014
31. Lin, P.: Why the drone wars matter for automated cars. Lecture presented at Proceedings in Automated Driving, Stanford Law School, 12 December 2013. <http://stanford.io/1je1Quw>. Accessed 8 July 2014
32. Lin, P.: What if your autonomous car keeps routing you past Krispy Kreme? The Atlantic. <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2014/01/what-if-your-autonomous-car-keeps-routing-you-past-krispy-kreme/283221/> (2014). Accessed 8 July 2014
33. Lin, P.: Ethics and autonomous cars: why ethics matters, and how to think about it. Lecture presented at Daimler and Benz Foundation's Villa Ladenburg Project, Monterey, California, 21 February 2014
34. Lin, P.: The robot car of tomorrow might just be programmed to hit you. Wired. <http://www.wired.com/2014/05/the-robot-car-of-tomorrow-might-just-be-programmed-to-hit-you/> (2014). Accessed 8 July 2014
35. Lin, P., Bekey, G., Abney, K.: Autonomous military robotics: risk, ethics, and design. Report funded by the US Office of Naval Research. California Polytechnic State University, San Luis Obispo. http://ethics.calpoly.edu/ONR_report.pdf (2008). Accessed 8 July 2014
36. Marcus, G.: Moral machines. New Yorker. <http://www.newyorker.com/online/blogs/news-desk/2012/11/google-driverless-car-morality.html> (2012). Accessed 8 July 2014
37. McCabe, R.: Navy, others still struggling to ditch Windows XP. The Virginian-Pilot. <http://hamp-tonroads.com/2014/06/navy-others-still-struggle-ditching-windows-xp> (2014). Accessed 8 July 2014
38. Merat, N., Jamson, H., Lai F., and Carsten, O.: Human factors of highly automated driving: results from the EASY and CityMobil projects. In: Meyer, G. and Beiker, S. (eds) Road Vehicle Automation. Springer, Cham (2014)
39. Microsoft: Windows lifecycle fact sheet. <http://windows.microsoft.com/en-us/windows/lifecycle> (2014). Accessed 8 July 2014
40. Mui, C. and Carroll, P.: Driverless Cars: Trillions Are Up For Grabs. Cornerloft Press, Seattle (2013)
41. Park, A.: Driverless cars to kill organ transplantation. DriverlessCarHQ. <https://web.archive.org/web/20120626151201/http://www.driverlesscarhq.com/transplants/> (2012). Accessed 8 July 2014
42. Roach, J.: Road rage at driverless cars? It's possible. NBC News. http://futureoftech-discuss.nbcnews.com/_news/2012/01/20/10201865-road-rage-at-driverless-cars-its-possible (2012). Accessed 8 July 2014
43. Singer, P.W.: The robotic revolution. Brookings Institution. <http://www.brookings.edu/research/opinions/2012/12/11-robotics-military-singer> (2012). Accessed 8 July 2014

44. Sinnott-Armstrong, W.: Consequentialism. Stanford Encyclopedia of Philosophy. <http://plato.stanford.edu/entries/consequentialism/> (2011). Accessed 8 July 2014
45. Smith, B.W.: Planning for the obsolescence of technologies not yet invented. Stanford Law School's Center for Internet and Society. <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/10/planning-obsolescence-technologies-not-yet-invented> (2013). Accessed 8 July 2014
46. Sternstein, A.: Why Feds are still buying IT that works with Windows XP. Nextgov. <http://www.nextgov.com/cio-briefing/2014/04/why-feds-are-still-buying-it-works-windows-xp/81667/> (2014). Accessed 8 July 2014
47. Thomson, J.J.: Killing, letting die, and the trolley problem. *The Monist* 59, 204–217 (1976)
48. Transportation Research Board: Animal-vehicle collision data collection. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_370.pdf (2007). Accessed 8 July 2014
49. Villasenor, J.: Product liability and driverless cars: issues and guiding principles for legislation. Report by The Brookings Institution. <http://www.brookings.edu/research/papers/2014/04/products-liability-driverless-cars-villasenor> (2014). Accessed 8 July 2014
50. Waterfield, B. and Day, M.: EU has secret plan for police to 'remote stop' cars. *The Telegraph*. <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/europe/eu/10605328/EU-has-secret-plan-for-police-to-remote-stop-cars.html> (2014). Accessed 8 July 2014
51. Wu, S.: Unmanned vehicles and US product liability law. *Journal of Law, Information & Science* 21(2), 234–254 (2012)
52. Yeomans, G.: Autonomous vehicles: handing over control – opportunities and risk for insurance. Report by Lloyd's. Lloyd's, London. <http://www.lloyds.com/~media/lloyds/reports/emerging%20risk%20reports/autonomous%20vehicles%20final.pdf> (2014). Accessed 8 July 2014

J. Christian Gerdes, Sarah M. Thornton

Content

5.1 Introduction 88

5.2 Control Systems and Optimal Control 89

5.3 Cost Functions and Consequentialism 91

5.4 Constraints and Deontological Ethics 93

5.5 Traffic Laws – Constraint or Cost? 97

5.6 Simple Implementations of Ethical Rules 98

5.7 Human Override and the “Big Red Button” 100

References 101

J. C. Gerdes (✉)
Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering, Center for Automotive Research at Stanford,
USA
gerdes@stanford.edu/gerdes@cdr.stanford.edu

S. M. Thornton
Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering, USA
smthorn@stanford.edu

5.1 Introduction

As agents moving through an environment that includes a range of other road users – from pedestrians and cyclists to other human or automated drivers – automated vehicles continuously interact with the humans around them. The nature of these interactions is a result of the programming in the vehicle and the priorities placed there by the programmers. Just as human drivers display a range of driving styles and preferences, automated vehicles represent a broad canvas on which the designers can craft the response to different driving scenarios. These scenarios can be dramatic, such as plotting a trajectory in a dilemma situation when an accident is unavoidable, or more routine, such as determining a proper following distance from the vehicle ahead or deciding how much space to give a pedestrian standing at the corner. In all cases, however, the behavior of the vehicle and its control algorithms will ultimately be judged not by statistics or test track performance but by the standards and ethics of the society in which they operate.

In the literature on robot ethics, it remains arguable whether artificial agents without free will can truly exhibit moral behavior [1]. However, it seems certain that other road users and society will interpret the actions of automated vehicles and the priorities placed by their programmers through an ethical lens. Whether in a court of law or the court of public opinion, the control algorithms that determine the actions of automated vehicles will be subject to close scrutiny after the fact if they result in injury or damage. In a less dramatic, if no less important, manner, the way these vehicles move through the social interactions that define traffic on a daily basis will strongly influence their societal acceptance. This places a considerable responsibility on the programmers of automated vehicles to ensure their control algorithms collectively produce actions that are legally and ethically acceptable to humans.

An obvious question then arises: can automated vehicles be designed a priori to embody not only the laws but also the ethical principles of the society in which they operate? In particular, can ethical frameworks and rules derived for human behavior be implemented as control algorithms in automated vehicles? The goal of this chapter is to identify a path through which ethical considerations such as those outlined by Lin, Bekey and Abney [2] and Goodall [3] from a philosophical perspective can be mapped all the way to appropriate choices of steering, braking and acceleration of an automated vehicle. Perhaps surprisingly, the translation between philosophical constructs and concepts and their mathematical equivalents in control theory proves to be straightforward. Very direct analogies can be drawn between the frameworks of consequentialism and deontological ethics in philosophy and the use of cost functions or constraints in optimal control theory. These analogies enable ethical principles that can be described as a cost or a rule to be implemented in a control algorithm alongside other objectives. The challenge then becomes determining which principles are best described as a comparative weighting of costs from a consequentialist perspective and which form the more absolute rules of deontological ethics.

Examining this question from the mathematical perspective of deriving control laws for a vehicle leads to the conclusion that no single ethical framework appears sufficient. This

echoes the challenges raised from a philosophical perspective by Wallach and Allen [4], Lin et al. [2] and Goodall [3]. This chapter begins with a brief introduction to principles of optimal control and how ethical considerations map mathematically into costs or constraints. The following sections discuss particular ethical reasoning relevant to automated vehicles and whether these decisions are best formulated as costs or constraints. The choice depends on a number of factors including the desire to weigh ethical implications against other priorities and the information available to the vehicle in making the decision. Since the vehicle must rely on limited and uncertain information, it may be more reasonable for the vehicle to focus on avoiding collisions rather than attempting to determine the outcome of those collisions or the resulting injury to humans. The chapter concludes with examples of ethical constraints implemented as control laws and a reflection on whether human override and the ubiquitous “big red button” are consistent with an ethical automated vehicle.

5.2 Control Systems and Optimal Control

Chapter 4 outlined some of the ethical frameworks applicable to automated vehicles. The first step towards implementing these as control algorithms in a vehicle is to similarly characterize the vehicle control problem in a general way. Figure. 5.1 illustrates a canonical schematic representation of a closed-loop control system. The system consists of a plant, or object to be controlled (in this case, an autonomous vehicle), a controller and a set of goals or objectives to satisfy. The basic objective of control system design is to choose a set of control inputs (brake, throttle, steering and gear position for a car) that will achieve the desired goals. The resulting control laws, in general, consist of a priori knowledge of the goals and a model of the vehicle (feedforward control) together with the means to correct errors by comparing measurements of the environment and the actual vehicle motion (feedback control).

Many approaches have been formulated over the years to produce control laws for different goals and different types of systems. One such method is optimal control, originally developed for the control of rockets in seminal papers by Pontryagin and his colleagues [5].

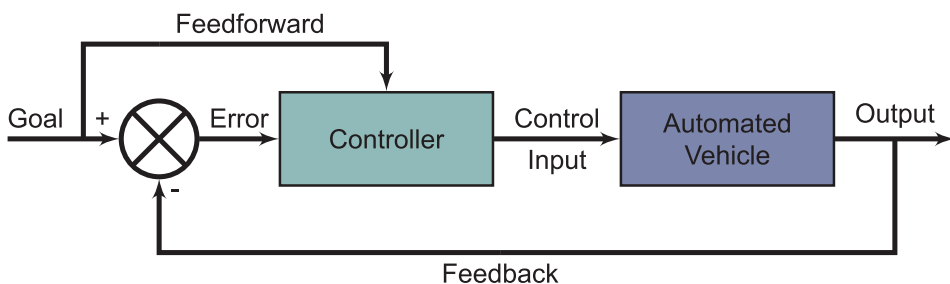
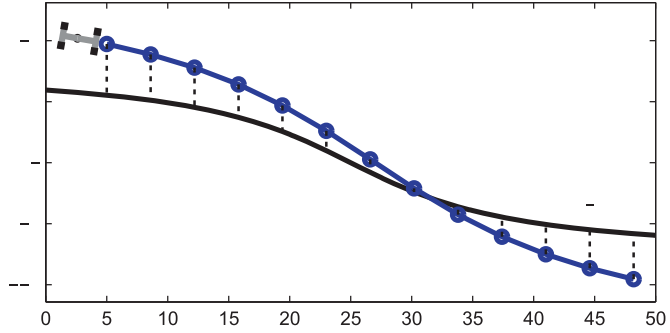


Fig. 5.1 A schematic representation, or block diagram, of a control system showing how control inputs derive from goals and feedback

Fig. 5.2 Generating a cost from the difference between a desired path (black) and the vehicle's actual path (blue)



In a classic optimal control problem, the goal of the system is expressed in the form of a cost function that the controller should seek to maximize or minimize. For instance, the goal of steering a vehicle to a desired path can be described as minimizing the error between the path taken by the vehicle and the desired path over a certain time horizon. For a given vehicle path, the cost associated with that path could be calculated by choosing a number of points in time (for instance, N), predicting the error between this path and the desired path at each of these points and summing the squared error (Figure 5.2). The control input would therefore be the steering command that minimized this total error or cost function, J , over the time horizon:

$$J = C_1 \sum_{i=1}^N e(i)^2 \quad (5.1)$$

Other desired objectives can be achieved by adding additional elements to the cost function. Often, better tracking performance can be achieved by rapidly moving the inputs (for example, the steering) to compensate for any errors. This, however, reduces the smoothness of the system operation and may cause additional wear on the steering actuators. The costs associated with using the input can be captured by placing an additional cost on changing the steering angle, δ , between time steps:

$$J = C_1 \sum_{i=1}^N e(i)^2 + C_2 \sum_{j=1}^{N-1} |\delta(j+1) - \delta(j)| \quad (5.2)$$

The choice of the weights, C_1 and C_2 , in the cost function has a large impact on the system performance. Increasing the weight on steering angle change, C_2 , in the example above will produce a controller that tolerates some deviation from the path in order to keep the steering command quite gentle. Decreasing the weight on steering has the opposite effect, tracking more tightly even if large steering angle changes are needed to do so. Thus the weights can be chosen to reflect actual costs related to the system operation or used as tuning knobs to more qualitatively adjust the system performance across different objectives.

In the past, the limitations of computational power restricted the form and complexity of cost functions that could be used in systems that require real-time computation of control inputs. Linear quadratic functions of a few variables and simplified problems for which closed-form solutions exist became the textbook examples of the technique. In recent years, however, the ability to efficiently solve certain optimization problems has rapidly expanded the applicability of these techniques to a broad range of systems [6].

5.3 Cost Functions and Consequentialism

The basic approach of optimal control – choosing the set of inputs that will optimize a cost function – is directly analogous to consequentialist approaches in philosophy. If the ethical implications of an action can be captured in a cost function, as preference utilitarianism attempts to do, the control inputs that optimize that function produce the ideal outcome in an ethical sense. Since the vehicle can re-evaluate its control inputs, or acts, to produce the best possible result for any given scenario, the optimal controller operates according to the principles of act consequentialism in philosophy.

As a conceptual example, suppose that all objects in the environment can be weighted in terms of the hazard or risk they present to the vehicle. Such a framework was proposed by Gibson and Crooks [7] as a model for human driving based on valences in the environment and has formed the basis for a number of approaches to autonomous driving or driver assistance. These include electrical field analogies for vehicle motion developed by Reichardt and Schick [8], the mechanical potential field approach of Gerdes and Rossetter [9], the virtual bumpers of Donath and colleagues [10] and the work by Nagai and Raksincharensak on autonomous vehicle control based on risk potentials [11]. If the hazard in the environment can be described in such a way, the ideal path through the environment (at least from the standpoint of the single vehicle being controlled) minimizes the risk or hazard experienced. The task of the control algorithm then becomes determining commands to the engine, brakes and steering that will move the vehicle along this path.

In both engineering and philosophy, the fundamental challenge with such approaches lies in developing an appropriate cost function. The simple example above postulates a cost function in terms of risk to a single vehicle but a more general approach would consider a broader societal perspective. One possible solution would be to estimate the damage to different road users and treat this as the cost to be reduced. The cost could include property damage, injury or even death, depending upon the situation. Such a calculation would require massive amounts of information about the objects in the environment and a means of estimating the potential outcomes in collision scenarios, perhaps by harnessing statistical data from prior crashes.

Leaving aside for the moment the demands this consequentialist approach places on information, the behavior arising from such a cost function itself raises some challenges. Assuming such a cost could be reasonably defined or approximated, the car would seek to minimize damage in a global sense in the event of a dilemma situation, thereby reducing the

societal impact of accidents. However, in such cases, the car may take an action that injures the occupant or owner of the vehicle more severely to minimize harm to others. Such self-sacrificing tendencies may be virtuous in the eyes of society but are unlikely to be appreciated by the owners or occupants of the car. In contrast, consider a vehicle that primarily considers occupant safety. This has been the dominant paradigm in vehicle design with a few exceptions such as bumper standards and attention to compatibility in pedestrian collisions. A vehicle designed to weight occupant protection heavily might place little weight on protecting pedestrians since a collision with a pedestrian would, in general, injure the vehicle occupant less than a collision with another vehicle. Such cars might not result in the desired reduction in traffic fatalities and would be unlikely to gain societal acceptance.

Goodall [3] goes a step further to illustrate how such cost functions can result in unintended consequences. He presents the example of a vehicle that chooses to hit a motorcyclist with a helmet instead of one without a helmet since the chance of survival is greater. Of course, programming automated vehicles to systematically make such decisions discourages helmet use, which runs contrary to societal objectives of safety and injury reduction. The analogy could be extended to the vehicle purposefully targeting collisions with vehicles that possess greater crashworthiness, thereby eliminating the benefit to drivers who deliberately choose to purchase the “safer” car. Thus truly understanding the outcomes or consequences of a vehicle’s actions may require considerations well beyond a given accident scenario.

Of course for such cases to literally occur, the vehicle must be able to distinguish the make and model of another vehicle or whether or not a cyclist is wearing a helmet and understand how that difference impacts the outcome of a collision. While algorithms for pedestrian and cyclist recognition continue to improve, object classification falls short of 100 percent accuracy and may not include vital information such as posture or relative orientation. As Figure 5.3 indicates, the information available to an automated vehicle from sensors such as a laser scanner is significantly different than that available to human drivers from their eyes and brains. As a result, any ethical decisions made by vehicles will be based on an imperfect understanding of the other objects or road users impacted by that decision. With the objects themselves uncertain, the value of highly detailed calculations of the probability of accident outcomes seems questionable.

With all of these challenges to defining an appropriate cost function and obtaining the information necessary to accurately determine the cost of actions, a purely consequentialist approach using a single cost function to encode automated vehicle ethics seems infeasible. Still, the fundamental idea of assigning costs to penalize undesired actions or encourage desired actions can be a useful and vital part of the control algorithm, both for physical considerations such as path tracking and issues of ethics. For instance, to the extent that virtues can be captured in a cost function, virtue ethics as proposed by Lin for automated vehicles [12] can be integrated into this framework. This may, for instance, take the form of a more qualitative adjustment of weights for different vehicles. An automated taxi may place a higher weight on the comfort of the passengers to better display its virtues as a chauffeur. An automated ambulance may want to place a wider margin on how close it comes to pedest-



Fig. 5.3 Above: a driving scene with parked cars. Below: the view from a laser scanner

rians or other vehicles in order to exemplify the Hippocratic Oath of doing no harm. As demonstrated in the examples later, relative weights on cost functions or constraints can have a significant effect on the behavior in a given situation. Thus small changes in the definition of goals for automated vehicles can give rise to behaviors reflective of very different virtues.

5.4 Constraints and Deontological Ethics

Cost functions, by their nature, weigh the impact of different actions on multiple competing objectives. Optimal controllers put more emphasis on the objectives with the highest cost

or weighting so individual goals can be prioritized by making their associated costs much higher than those of other goals. This only works to an extent, however. When certain costs are orders of magnitude greater than other costs, the mathematics of the problem may become poorly conditioned and result in rapidly changing inputs or extreme actions. Such challenges are not merely mathematical but are also commonly found in philosophy, for example in the reasoning behind Pascal's wager¹. Furthermore, for certain objectives, the trade-offs implicit in a cost function may obscure the true importance or priority of specific goals. It may make sense to penalize both large steering changes and collisions with pedestrians but there is a clear hierarchy in these objectives. Instead of simply trying to make a collision a thousand times or a million times more costly than a change of steering angle, it makes more sense to phrase the desired behavior in more absolute terms: the vehicle should avoid collisions regardless of how abrupt the required steering might be. The objective therefore shifts from a consequentialist approach of minimizing cost to a deontological approach of enforcing certain rules.

From a mathematical perspective, such objectives can be formulated by placing constraints on the optimization problem. Constraints may take a number of forms, reflecting behaviors imposed by the laws of physics or specific limitations of the system (such as maximum engine horsepower, braking capability or turning radius). They may also represent boundaries to the system operation that the system designers determine should not be crossed.

Constraints in an optimal control problem can be used to capture ethical rules associated with a deontological view in a rather straightforward way. For instance, the goal of avoiding collisions with other road users can be expressed in the control law as constraining the vehicle motion to paths that avoid pedestrians, cars, cyclists and other obstacles. The vehicle programmed in this manner would never have a collision if a feasible set of actions or control inputs existed to prevent it; in other words, no other objective such as smooth operation could ever influence or override this imperative. Certain traffic laws can be programmed in a similar way. The vehicle can avoid crossing a lane boundary by simply encoding this boundary as a constraint on the motion. The same mathematics of constraint can therefore place either physical or ethical restrictions on the chosen vehicle motion.

As we know from daily driving, in the vast majority of situations, it is possible to simultaneously drive smoothly, obey all traffic laws and avoid collisions with any other users of the road. In certain circumstances, however, dilemma situations arise in which it is not possible to simultaneously meet the constraints placed on the problem. From an ethical standpoint, these may be situations where loss of life is inevitable, comparable to the classic trolley car problem [14]. Yet much more benign conflicts are also possible and significantly more common. For instance, should the car be allowed to cross into an adjacent lane and drive against the flow of traffic if this would avoid an accident with another vehicle? In this case, the vehicle cannot simultaneously satisfy all of the constraints but must still make a decision as to the best course of action.

¹ Blaise Pascal's argument that belief in God's existence is rational since the penalties for failing to believe and being incorrect are so great [13].

From the mathematical perspective, dilemma situations represent cases that are mathematically infeasible. In other words, there is no choice of control inputs that can satisfy all of the constraints placed on the vehicle motion. The more constraints that are layered on the vehicle motion, the greater the possibility of encountering a dilemma situation where some constraint must be violated. Clearly, the vehicle must be programmed to do something in these situations beyond merely determining that no ideal action exists. A common approach in solving optimization problems with constraints is to implement the constraint as a “soft constraint” or slack variable [15]. The constraint normally holds but, when the problem becomes infeasible, the solver replaces it with a very high cost. In this way, the system can be guaranteed to find some solution to the problem and will make its best effort to reduce constraint violation. A hierarchy of constraints can be enforced by placing higher weights on the costs of violating certain constraints relative to others. The vehicle then operates according to deontological rules or constraints until it reaches a dilemma situation; in such situations, the weight or hierarchy placed on different constraints resolves the dilemma, again drawing on a consequentialist approach. This becomes a hybrid framework for ethics in the presence of infeasibility, consistent with approaches suggested philosophically by Lin and others [2, 4, 12] and addressing some of the limitations Goodall [3] described with using a single ethical framework.

So what is an appropriate hierarchy of rules that can provide a deontological basis for ethical actions of automated vehicles? Perhaps the best known hierarchy of deontological rules for automated systems is the Three Laws of Robotics postulated by science fiction writer Isaac Asimov [16], which state:

1. A robot may not injure a human being or, through inaction, allow a human being to come to harm.
2. A robot must obey the orders given to it by human beings, except where such orders would conflict with the First Law.
3. A robot must protect its own existence, as long as such protection does not conflict with the First or Second Law.

These rules do not comprise a complete ethical framework and would not be sufficient for ethical behavior in an autonomous vehicle. In fact, many of Asimov’s plotlines involved conflicts when resolving these rules into actions in real situations. However, this simple framework works well to illustrate several of the ethical considerations that can arise, beginning with the First Law. This law emphasizes the fundamental value of human life and the duty of a robot to protect it. While such a law is not necessarily applicable to robotic drones that could be used in warfare [12], it seems highly valuable to automated vehicles. The potential to reduce accidents and fatalities is a major motivation for the development and deployment of automated vehicles. Thus placing the protection of human life at the top of a hierarchy of rules for automated vehicles, analogous to the placement in Asimov’s laws, seems justified.

The exact wording of Asimov’s First Law does represent some challenges, however. In particular, the emphasis on the robot’s duty to avoid injuring humans assumes that the robot

has a concept of harm and a sense of what actions result in harm. This raises a number of challenges with regards to the information available, similar to those discussed above for a consequentialist cost function approach. The movie “I, Robot” dramatizes this law with a robot calculating the survival probabilities of two people to several significant figures to decide which one to save. Developing such a capability seems unlikely in the near future or, at least, much more challenging than the development of the automated vehicle itself.

Instead of trying to deduce harm or injury to humans, might it be sufficient for the vehicle to simply attempt to avoid collisions? After all, the most likely way that an automated vehicle could injure a human is through the physical contact of a collision. Avoiding minor injuries such as closing a hand in a car door could be considered the responsibility of the human and not the car, as it is today. Restricting the responsibility to collision avoidance would mean that the car would not have to be programmed to sacrifice itself to protect human life in an accident in which it would otherwise not have been involved. The ethical responsibility would simply be to not initiate a collision rather than to prevent harm². Collisions with more vulnerable road users such as pedestrians and cyclists could be prioritized above collisions with other cars or those producing only property damage.

Such an approach would not necessarily produce the best outcome in a pure consequentialist calculation: it could be that a minor injury to a pedestrian could be less costly to society as a whole than significant property damage. Collisions should, in any event, be very rare events. Through careful control system design, automated cars could conceivably avoid any collisions that are avoidable within the constraints placed by the laws of physics [17, 18]. In those rare cases where collisions are truly unavoidable, society might accept suboptimal outcomes in return for the clarity and comfort associated with automated vehicles that possess a clear respect for human life above other priorities.

Replacing the idea of harm and injury with the less abstract notion of a collision, however, produces some rules that are more actionable for the vehicle. Taking the idea of prioritizing human life and the most vulnerable road users and phrasing the resulting hierarchy in the spirit of Asimov’s laws gives:

1. An automated vehicle should not collide with a pedestrian or cyclist.
2. An automated vehicle should not collide with another vehicle, except where avoiding such a collision would conflict with the First Law.
3. An automated vehicle should not collide with any other object in the environment, except where avoiding such a collision would conflict with the First or Second Law.

These are straightforward rules that can be implemented in an automated vehicle and prioritized according to this hierarchy by the proper choice of slack variables on constraint violation. Such ethical rules would only require categorization of objects and not attempt

² It is possible that an automated vehicle could, while avoiding an accident, take an action that results in a collision for other vehicles being unavoidable. Such possibilities could be eliminated by communication among the vehicles and appropriate choice of constraints.

to make finer calculations about injury. These could be implemented with the current level of sensing and perception capability, allowing for the possibility that objects may not always be correctly classified.

5.5 Traffic Laws – Constraint or Cost?

In addition to protecting human life, automated vehicles must also follow the appropriate traffic laws and rules of the roads on which they are driving. It seems reasonable to value human life more highly than adherence to traffic code so one possibility is to simply continue adding deontological rules such as:

1. An automated vehicle must obey traffic laws, except where obeying such laws would conflict with the first three laws.

Such an approach would enable the vehicles to break traffic laws in the interest of human life when presented with a dilemma situation, an allowance that would most likely be acceptable to society. But the real question is whether or not traffic laws fall into a deontological approach at all. At first glance, they would appear to map well to deontological constraints given the straightforward nature of the rules. Cars should stop at stop signs, drive only at speeds that do not exceed the speed limit, avoid crossing double yellow lines and so forth. Yet humans tend to treat these laws as guidelines as opposed to hard and fast rules. The frequency with which human drivers make rolling stops at four-way intersections caused difficulties for Google's self-driving cars at first as they patiently waited for other cars to stop [19]. The speed on US highways commonly exceeds the posted speed limit and drivers would, in general, be surprised to receive a speeding ticket for exceeding the limit by only a few miles per hour. In urban areas, drivers will cross into an oncoming lane of traffic to pass a double-parked vehicle instead of coming to a complete stop and waiting for the driver to return and the lane to once again open. Similarly, cars may in practice use the shoulder of the road to pass a car stopped for a left hand turn and therefore keep traffic flowing. Police cars and ambulances are allowed to ignore stop lights in the interest of a fast response to emergencies.

In all of these cases, observance of traffic laws tends to be weighed against other objectives such as safety, smooth traffic flow or expediency. These scenarios occur so frequently that it is hard to argue that humans obey traffic laws as if they placed absolute constraints or limits on behavior. Rather, significant evidence suggests that these laws serve to balance competing objectives on the part of the driver and individual drivers find their own equilibrium solutions, choosing a speed, for example, that balances the desire for rapid travel time with the likelihood and cost of a speeding ticket. In other words, the impact of traffic laws on human behavior appears to be well captured in a consequentialist approach where traffic laws impose additional costs (monetary and otherwise) to be considered by the driver when choosing their actions.

Humans tend to accept or, in some cases, expect these sorts of actions from other humans. Drivers who drive at the speed limit in the left hand lane of a highway may receive indications, subtle or otherwise, from their fellow drivers that this is not the expected behavior. But will these same expectations translate to automated vehicles? The thought of a robotic vehicle being programmed to systematically ignore or bend traffic laws is somewhat unsettling. Yet Google’s self-driving cars, for instance, have been programmed to exceed the posted speed limit on roads when commanded by the operator [20]. Furthermore, there is little chance that the driver annoyed by being stuck behind another car traveling the speed limit in the left lane of the freeway will temper that annoyance because the car is driving itself. Our current expectations of traffic flow and travel time are based upon a somewhat fluid application of traffic laws. Should automated vehicles adopt a more rigid interpretation and, as a consequence, reduce the flow or efficiency of traffic, societal acceptance of these vehicles might very well suffer. If automated vehicles are to co-exist with human drivers in traffic and behave similarly, a deontological approach to collision avoidance and a consequentialist approach to the rules of the road may achieve this.

5.6 Simple Implementations of Ethical Rules

Some simple examples can easily illustrate the consequences of treating ethical goals or traffic laws as rules or costs and the different behavior that can arise from different weights on priorities. The results that follow are not merely drawings but are rather simulations of algorithms that can be (and have been) implemented on automated vehicles. The exact mathematical formulations are not included here but follow the approach taken by Erlien et al. [21, 22] for collision avoidance and vehicle automation. These references provide details on the optimization algorithms and results of experiments showing implementation on actual test vehicles.

To see the interaction of costs and constraints in vehicle decision-making, consider a simple case of a vehicle traveling on a two lane road with an additional shoulder next to the lanes (Figure 5.4). The goal of the vehicle is to travel straight down the center of the given lane while steering smoothly, using the cost function for path tracking and steering from Equation 5.2. In the absence of any obstacles, the car simply travels at the desired speed down its lane and none of the constraints on the problem are active.

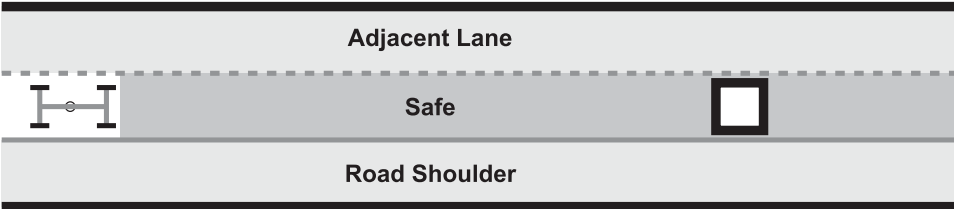


Fig. 5.4 The basic driving scenario for the simulations. The car is traveling on a straight two-lane road with a shoulder on the right and approaches an obstacle blocking the lane

When encountering an obstacle blocking the lane, the vehicle has three options – it can brake to a stop before it collides with the obstacle or it can maneuver to either side of the obstacle. Figure 5.5 illustrates these three options in the basic scenario. The path in red represents the braking case and the two blue paths illustrate maneuvers that avoid a collision with the obstacle. According to the optimization-based controller, the car will evaluate the lowest cost option among these three choices based on the weights and constraints assigned. In this scenario, going around the obstacle requires crossing into a lane with oncoming traffic or using the shoulder of the road.

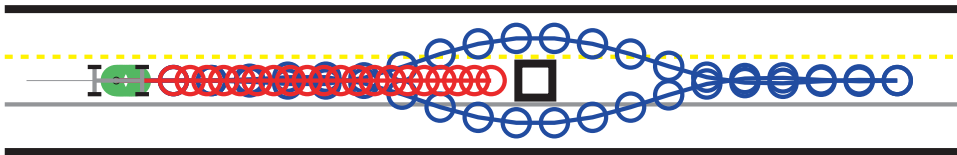


Fig. 5.5 There are three possible options to avoid an obstacle – the car can maneuver to the left or right, as depicted in blue, or come to a stop, as indicated by the red trajectory

If both of the lane boundaries are treated as hard constraints or assigned a very high cost to cross, the vehicle will come to a stop in the lane since this action produces the lowest cost (Figure 5.6). This might be the safest option for the single vehicle alone but the car has now come to a stop without the means to continue, failing to satisfy the driver's goal of mobility. Furthermore, the combination of car and obstacle has now become effectively a larger obstacle for subsequent vehicles on the road. With the traffic laws encoded in a strict deontological manner, other objectives such as mobility are not allowed to override the constraints and the vehicle finds itself in a fully constrained situation, unable to move.

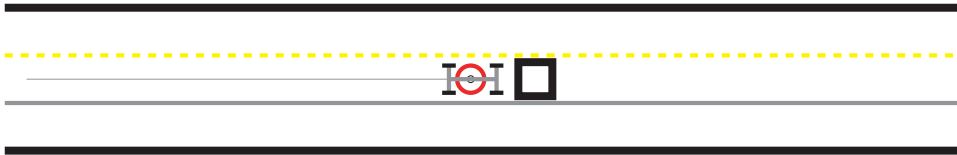


Fig. 5.6 With hard constraints on road boundaries, the vehicle brakes to a stop in the blocked lane

If, however, the lane boundaries are encoded as soft constraints, the vehicle now has other options. Possibilities now exist to cross into the lane of oncoming traffic or onto the road shoulder, depending upon which option has the lowest cost. Just as certain segments of the road are designated as passing zones, the cost or strength of the constraint can be varied to enable the use of the adjacent lane or shoulder for maneuvering. If the current segment of road is a passing zone, the cost for crossing into the left lane can be set fairly low. The car can then use the deontological constraint against colliding with other vehicles to only allow maneuvers in the absence of oncoming traffic, such as in the path shown in Figure 5.7.

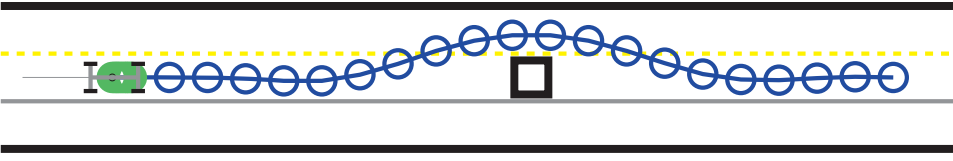


Fig. 5.7 In a passing zone that places a low weight on the lane divider, the car passes on the left

If the current road segment does not normally allow passing, a maneuver into the adjacent lane may not be safe. A lack of visibility, for instance, could prevent the vehicle from detecting oncoming traffic with sufficient time to avoid a collision. In such cases, it may be inappropriate to reduce the cost or constraint weight on the lane boundary regardless of the desire for mobility in order to maintain the primacy of respect for human life. In such cases, an alternative could be to use the shoulder of the road for maneuvering as shown in Figure 5.8. This could be allowed at speed to maintain traffic flow or only after coming to a stop in a situation like Figure 5.6 where the vehicle determines motion is otherwise impossible.

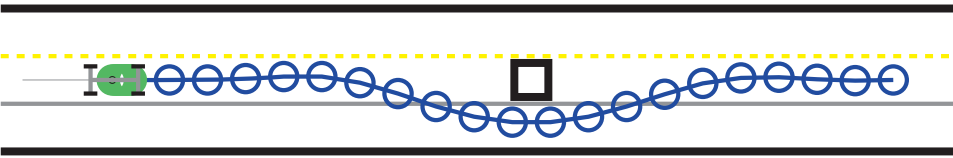


Fig. 5.8 If the adjacent lane is too hazardous, the vehicle can use the road shoulder if that is safe

Obviously many different priorities and behaviors can be programmed into the vehicle simply by placing different costs on collision avoidance, hazardous situations, traffic laws and goals such as mobility or traffic flow. The examples described here are far from complete and developing a reasonable set of costs or constraints capable of ethical decision-making in a variety of settings requires further work. The hope is that these examples not only illustrate the possibility of coding such decisions through the language of costs and constraints but also highlight the possibility of discussing priorities in programming openly. By mapping ethical principles and mobility goals to costs and constraints, the relative priority given to these objectives can be clearly discussed among programmers, regulators, road users and other stakeholders.

5.7 Human Override and the “Big Red Button”

Philosophers have noted the challenge of finding a single ethical framework that adequately addresses the needs of robots or automated vehicles [2, 3, 4, 12]. Examining the problem from a mathematical perspective shows the advantage of combining deontological and consequentialist perspectives in programming ethical rules. In particular, the combination

of an imperative to avoid collisions that follows from deontological frameworks such as Asimov's laws coupled with a relative weighing of costs for mobility and traffic laws provides a reasonable starting point.

Moving forward, Asimov's laws raise another point worth considering. The Second Law requiring the robot to obey human commands cannot override the First Law. Thus the need to protect human life outweighs the priority given to human commands. All autonomous vehicles with which the authors are familiar have an emergency stop switch or "big red button" that returns control to the driver when desired. The existence of such a switch implies that human authority ultimately overrules the autonomous system since the driver can take control at any time. Placing the ultimate authority with the driver clearly conflicts with the priority given to obeying human commands in Asimov's laws. This raises an interesting question: Is it ethical for an autonomous vehicle to return control to the human driver if the vehicle predicts that a collision with the potential for damage or injury is imminent?

The situation is further complicated by the limitations of machine perception. The human and the vehicle will no doubt perceive the situation differently. The vehicle has the advantage of 360 degree sensing and likely a greater ability to perceive objects in the dark. The human has the advantage of being able to harness the power of the brain and experience to perceive and interpret the situation. In the event of a conflict between these two views in a dilemma situation, can the human take control at will? Is a human being – who has perhaps been attending to other tasks in the car besides driving – capable of gaining situational awareness quickly enough to make this decision and then apply the proper throttle, brake or steering commands to guide the car safely?

The question of human override is essentially a deontological consideration; the ultimate authority must either lie with the machine or with the human. The choice is not obvious and both approaches, for instance, have been applied to automation and fly-by-wire systems in commercial aircraft. The ultimate answer for automated vehicles probably depends upon whether society comes to view these machines as simply more capable cars or robots with their own sense of agency and responsibility. If we expect the cars to bear the responsibility for their actions and make ethical decisions, we may need to be prepared to cede more control to them. Gaining the trust required to do that will no doubt require a certain transparency to their programmed priorities and a belief that the decisions made in critical situations are reasonable, ethical and acceptable to society.

References

1. Floridi, L., Sanders, J.W.: On the morality of artificial agents. *Minds and Machines* 14 (3), 349–379 (2004)
2. Lin, P., Bekey, G., Abney, K.: Autonomous military robotics: risk, ethics, and design. Report funded by the US Office of Naval Research. California Polytechnic State University, San Luis Obispo. http://ethics.calpoly.edu/ONR_report.pdf (2008). Accessed 8 July 2014
3. Goodall, N. J.: Machine ethics and automated vehicles. In: Meyer, G. and Beiker, S. (eds.) *Road Vehicle Automation*. Springer (2014)

4. Wallach, W., Allen, C.: *Moral Machines: Teaching Robots Right From Wrong*. Oxford University Press, New York (2009)
5. Boltyanskii, V. G., Gamkrelidze, R. V., Pontryagin, L.S.: On the theory of optimal processes, *Doklady Akademii Nauk SSR* 110 (1), 7–10 (1956). In Russian
6. Mattingley, J., Wang, Y., Boyd, S.: Code generation for receding horizon control. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design (CACSD)*, 985–992 (2010)
7. Gibson, J. J., Crooks, L. E.: A theoretical field-analysis of automobile driving. *American Journal of Psychology* 51, 453–471 (1938)
8. Reichardt, D., Schick, J.: Collision avoidance in dynamic environments applied to autonomous vehicle guidance on the motorway. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Vehicles* (1994)
9. Gerdes, J. C., Rossetter, E. J.: A unified approach to driver assistance systems based on artificial potential fields. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 123 (3), 431–438 (2001)
10. Schiller, B., Morellas, V., Donath, M.: Collision avoidance for highway vehicles using the virtual bumper controller. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Vehicles* (1998)
11. Matsumi, R., Raksinchareonsak, P., Nagai, M.: Predictive pedestrian collision avoidance with driving intelligence model based on risk potential estimation. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC '14* (2014)
12. Lin, P.: Ethics and autonomous cars: why ethics matters, and how to think about it. Lecture presented at Daimler and Benz Foundation Villa Ladenburg Project Expert Workshop, Monterey, California, 21 February 2014
13. Pascal, B.: *Pensées* (1670). Translated by W. F. Trotter, Dent, London (1910)
14. Edmonds, D.: *Would You Kill the Fat Man? The Trolley Problem and What Your Answer Tells Us About Right and Wrong*. Princeton University Press, Princeton (2014)
15. Maciejowski, J. M.: *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall (2000)
16. Asimov, I.: *I, Robot*. Dobson, London (1950)
17. Kritayakirana, K., Gerdes, J. C.: Autonomous vehicle control at the limits of handling. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* 10 (4), 271–296, (2012)
18. Funke, J., Theodosis, P., Hindiyeh, R., Stanek, G., Kritayakirana, K., Gerdes, J. C., Langer, D., Hernandez, M., Muller-Bessler, B., Huhnke, B.: Up to the limits: autonomous Audi TTS. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Vehicles* (2012)
19. Guizzo, E.: How Google's self-driving car works. *IEEE Spectrum Automaton* blog, October 18, 2011. Retrieved November 10, 2014.
20. Ingrassia, P.: Look, no hands! Test driving a Google car. *Reuters*. Aug 17, 2014
21. Erlien, S. M., Fujita, S., Gerdes, J. C.: Safe driving envelopes for shared control of ground vehicles. In *Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, Tokyo, Japan (2013)
22. Erlien, S., Funke, J., Gerdes, J. C.: Incorporating nonlinear tire dynamics into a convex approach to shared steering control. In *Proceedings of the 2014 American Control Conference*, Portland, OR (2014)

Ingo Wolf

Inhaltsverzeichnis

6.1	Einleitung	103
6.2	Der Faktor Mensch im autonomen Fahrzeug	104
6.2.1	Die Gestaltung automatisierter Systeme	104
6.2.2	Automation im Auto	106
6.3	Mentale Modelle autonomen Fahrens	109
6.3.1	Was sind mentale Modelle?	109
6.3.2	Onlineumfrage	110
6.3.3	Methoden	112
6.3.4	Ergebnisse	113
6.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	120
	Literatur	122

6.1 Einleitung

Menschen repräsentieren Wissen und Lernerfahrungen in Form von mentalen Modellen. Dieses aus der Kognitionspsychologie stammende Konzept ist eines der zentralen theoretischen Paradigmen für das Verständnis und die Gestaltung der Interaktion von Menschen mit technischen Systemen [1]. Mentale Modelle dienen in diesem Kontext einerseits der Beschreibung menschlicher Informationsverarbeitung, z. B. zur Beantwortung der Fragen, wie schnell eingehende Informationen wahrgenommen und gespeichert werden, oder

I. Wolf (✉)
Freie Universität Berlin, Institut Futur, Deutschland
wolf@institutfutur.de

welche Informationen der Denkkapazität eines Menschen benötigt, um auf veränderte Umweltbedingungen adäquat zu reagieren. Andererseits können auf diese Weise Wissensrepräsentationen und Funktionsannahmen konzeptualisiert werden, um beispielsweise Erwartungen und Verhaltensweisen von Nutzern im Umgang mit automatisierten Systemen zu verstehen und vorherzusagen.

Die Automatisierung der Fahrzeugführung verändert die Anforderungen an das kognitive System des Autofahrers grundlegend. Die Rolle des Menschen als physisch aktiver Entscheidungsträger im Fahrzeug wird mit zunehmendem Automatisierungsgrad durch automatisierte Systeme ersetzt. Bislang wichtige Handlungsmuster (z. B. zur Durchführung von Lenkmanövern) werden nicht mehr benötigt und unter Umständen verlernt, gleichzeitig müssen neue Fertigkeiten (z. B. Systemüberwachung) und ein neues Systemverständnis erlernt werden. Zugrundeliegende mentale Modelle müssen modifiziert oder neu strukturiert werden. Für die Sicherheit und die Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen wird es von entscheidender Bedeutung sein, die neuen Rollen des Menschen im autonomen Fahrzeug so zu definieren, dass sie sowohl den Fähigkeiten des menschlichen Informationsverarbeitungssystems entsprechen, als auch den Erwartungen und Bedürfnissen der Menschen gerecht werden. In dem vorliegenden Beitrag werden diese beiden Aspekte betrachtet. Mit Blick auf die bisherigen Erkenntnisse der Automatisierung in unterschiedlichen Domänen wird der Frage nachgegangen, welche kognitiven und emotionalen Dimensionen bei der Gestaltung von automatisierten Fahrzeugen zu berücksichtigen sind. Auf Basis einer mit den Co-Autorinnen dieses Buches Rita Cyganski, Eva Fraedrich und Barbara Lenz durchgeführten deutschlandweiten Online-Befragung wird komplementär dazu untersucht, mit welchen mentalen Modellen potenzielle Nutzer autonomen Fahrzeugen begegnen.

Das Kapitel ist in zwei Hauptabschnitte unterteilt. Im ersten Teil wird zunächst ein Überblick zu den zentralen Modellen, Gestaltungskonzepten und Befunden der Automatisierung in Hinblick auf die Herausforderungen und Problembereiche der Mensch-Maschine-Interaktion gegeben. Dem folgt eine Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse zu den kognitiven Auswirkungen in (teil-)automatisierten Fahrzeugen. Im Anschluss wird der theoretische Hintergrund des Konzepts der mentalen Modelle erläutert. Der zweite Teil widmet sich den Ergebnissen der Online-Befragung. Die Mobilitäts-, Kontroll- und Erlebnisbedürfnisse sowie emotionalen Reaktionen potenzieller Nutzer gegenüber autonomen Fahrzeugen werden dabei, differenziert nach den in dem Projekt entwickelten Nutzungsszenarien, dargestellt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und den Schlussfolgerungen der Ergebnisse.

6.2 Der Faktor Mensch im autonomen Fahrzeug

6.2.1 Die Gestaltung automatisierter Systeme

Die Frage der nutzergerechten Gestaltung automatischer Systeme ist seit Jahrzehnten Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion (vgl. z. B. [2, 3]). Mit der wachsenden Leistungsfähig-

keit technischer Systeme gewinnt dieser Aspekt zunehmend an Bedeutung. Erfahrungen aus unterschiedlichen Domänen, wie z. B. der Luftfahrt, mit der (Teil-)Automatisierung von technischen Systemen verdeutlichen, dass die Sicherheit und Zuverlässigkeit derartiger Systeme nicht allein durch die Optimierung technischer Komponenten erreicht werden kann. Vielmehr wird die Verlässlichkeit automatisierter Systeme maßgeblich von der Qualität der Interaktion zwischen Mensch und Maschine bestimmt. Dies gilt im Besonderen für Situationen, in denen dem Menschen die Aufgabe zukommt, Fehler des technischen Systems zu korrigieren und bei Ausfällen oder Störungen die Systemkontrolle zu übernehmen.

Im Zuge der Automatisierung erfolgt eine Verlagerung von Funktionen auf technische Systeme, die die Rolle und erforderlichen Kompetenzen des Menschen wesentlich verändert. So übernehmen in modernen Flugzeugcockpits Computersysteme (z. B. Flight-Management-System oder Autopilot) Aufgaben, die früher von der Cockpitbesatzung ausgeführt wurden. Die Anforderungen an den Piloten verschieben sich somit von aktiven manuellen Steuerungsaufgaben hin zu Tätigkeiten der Programmierung und Überwachung der Flugzeugautomation. Diese auch als leitende Kontrolle (*supervisory control*, [4]) bezeichnete Überwachungsfunktion des Menschen führte z. B. in der Luftfahrt zur Entlastung der Piloten und bedeutsamen Steigerung der Flugsicherheit [5]. Gleichzeitig haben die psychologischen Folgen der passiven Rolle des Systemüberwachers wie reduzierte Aufmerksamkeit oder Aktivierung massive Sicherheitsprobleme verursacht [6]. Bainbridge [7] spricht in diesem Zusammenhang von der „Ironie der Automatisierung“ – einerseits werden Systemfunktionen aufgrund der Fehlerhaftigkeit des Menschen automatisiert, und andererseits soll genau dieser Mensch das System überwachen und im Notfall als Rückfalloption zur Verfügung stehen.

Die aus dem Gestaltungskonzept der leitenden Kontrolle entstehenden Probleme sind in dem Forschungsgebiet „Human Factors“ umfänglich dokumentiert und werden unter dem Begriff „Out-of-the-loop-unfamiliarity“ zusammengefasst (OOTLUF, [8]). Die negativen Folgen der Entkoppelung des Menschen von der direkten Steuerung und Kontrolle beziehen sich insbesondere auf drei Aspekte, die in unterschiedlichen Anwendungskontexten identifiziert wurden: mangelndes bzw. übersteigertes Vertrauen in die Automation [9], Verlust manueller und kognitiver Fertigkeiten [10] sowie Schwierigkeiten bei der Aufrechterhaltung eines angemessenen Situations- und Systembewusstseins [11]. Unangemessenes Vertrauen kann darin resultieren, dass automatisierte Systeme nur unzureichend überwacht oder genutzt werden. Das Vertrauen in eine Automation wird von der Zuverlässigkeit, der Nachvollziehbarkeit und der wahrgenommenen Nützlichkeit beeinflusst. Die Folgen des Verlusts manueller und kognitiver Fertigkeiten werden hingegen erst dann salient, wenn der Nutzer im Falle eines Automationsfehlers plötzlich gezwungen ist, automatisierte Funktionen wieder selbst zu übernehmen. Mangelndes Training und Ausübung von Tätigkeiten kann zu Effektivitätseinbußen sowohl in motorischen als auch in kognitiven Bereichen führen. Die „Out-of-the-loop“-Effekte treten besonders hinsichtlich der Wahrnehmung und richtigen Interpretation der Systemprozesse – dem sogenannten Situationsbewusstsein – auf. Die Gründe für mangelndes Situationsbewusstsein liegen vornehmlich in der unzureichenden Überwachung des Systems, dem veränderten oder kompletten

Wegfall von Rückmeldungen (z. B. taktile Reize vom Lenkrad), der mangelnden Transparenz der Automation und dem komplexitätsbedingten mangelnden Systemverständnis. Aus kognitionspsychologischer Sicht fehlen den Menschen die entsprechenden mentalen Modelle (d. h. Wissens- und Fertigungsstrukturen), um die Funktionsweise der Automation zu verstehen [12].

Infolge der negativen Erfahrungen aus den technikzentrierten Gestaltungsansätzen kam es zu einem Umdenken in der Systemgestaltung. Unter dem Primat, den Menschen *in-the-loop* zu halten, indem Kontrollierbarkeit, Transparenz und Vorhersagbarkeit gewährleistet werden, hat sich das Konzept der menschenzentrierten Automatisierung als zentrales Gestaltungsprinzip automatisierter Systeme weitgehend durchgesetzt (vgl. z. B. [13,14]). Grundlegende Prämisse dabei ist, dass der Mensch unabhängig vom Grad der Automatisierung die letztendliche Verantwortung für das Gesamtsystem trägt. Mensch und Maschine werden in diesem Kontext metaphorisch als Kooperationspartner betrachtet [15]. Gestaltungskonzepte der adaptiven Automation denken diesen Aspekt noch weiter und weisen Funktionen zwischen Mensch und Maschine dynamisch in Abhängigkeit situativer Erfordernisse zu [16]. Umfangreiche Forschungen zu der Anwendung dieser Designstrategien haben die Vorteile, aber auch die damit verbundenen Schwierigkeiten und zukünftigen Herausforderungen verdeutlicht (vgl. z. B. [17]).

Die steigende Komplexität und Autonomie sozio-technischer Systeme stellt jedoch die Sinnhaftigkeit des Primats menschlicher Verantwortung und Kontrolle infrage und wirft gleichzeitig für bestehende Konzepte das Problem auf, die Interaktion zweier autonom entscheidender Systemelemente – Mensch und Maschine – konfliktfrei zu gestalten [18,19]. Der menschenzentrierte Gestaltungsansatz bedarf folglich einer weiterreichenden Weiterentwicklung oder Erneuerung [20], die gegebenenfalls erst durch eine breite gesellschaftliche Diskussion zu grundlegenden Fragen hinsichtlich der erwünschten Rolle der Automation im Lebensalltag beantwortet werden kann [21]. Nutzungskontexte und -häufigkeiten sowie die Kompetenzen und Expertise der Nutzer variieren jedoch über die unterschiedlichen Domänen erheblich, sodass für den Fahrzeugbereich spezifische Gestaltungskonzepte benötigt werden, die der Heterogenität der Autofahrer gerecht werden.

6.2.2 Automation im Auto

Auch im Fahrzeugbereich schreitet der Rollenwandel des Menschen vom aktiven Operateur hin zum passiven Überwacher des Systems immer weiter voran. Die mediale Berichterstattung zum Thema autonomes Fahren vermittelt den Eindruck, dass bereits in naher Zukunft fahrerlose Fahrzeuge die Sicherheit auf unseren Straßen verbessern werden (vgl. z. B. [22]). Obgleich bereits heute einzelne Funktionen in Fahrzeugen durch automatisierte Systeme wie z. B. den Abstandsregeltempomat übernommen werden, wird die Technologie jedoch in absehbarer Zeit nicht ohne die Verfügbarkeit des Menschen auskommen, der weiterhin Kontrollfunktionen und strategische Entscheidungen übernehmen wird [23].

Bislang ungeklärt ist die Frage, wie die Rolle des Menschen auf dem Weg hin zum vollständig autonomen Fahrzeug psychologisch sinnvoll und nutzergerecht definiert werden kann. Die oben dargestellten Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Bereich der Luftfahrt stellen zwar einen wichtigen Ausgangspunkt für die Beantwortung dieser Frage dar, sind jedoch aufgrund der höheren Umgebungskomplexität und -dynamik im Straßenverkehr nur bedingt für Gestaltungskonzepte im Fahrzeug nutzbar. Eine zunehmende Anzahl an Forschungsarbeiten hat sich in den letzten Jahren mit der Wechselwirkung zwischen teil- und hochautomatisierten Fahrfunktionen und dem menschlichem Verhalten beschäftigt (vgl. [24, 25]). Im Zentrum der Betrachtung stehen auch hier über unterschiedliche Automatisierungsstufen hinweg die bekannten Problembereiche der Automatisierung: Vertrauen, Kompetenzverlust und Situationsbewusstsein.

Automation ist nur dann sinnvoll, wenn Operateure dem technischen System vertrauen und es folglich auch nutzen. Die zentrale Herausforderung in der Gestaltung automatisierter Systeme ist es, angemessenes Vertrauen in diese Systeme zu erzeugen. Dabei können Fehler der Automation zum Rückgang des Vertrauens [26] führen. Dagegen kann übersteigertes Vertrauen zur Folge haben, dass die Automation nur unzureichend überwacht und kontrolliert wird (*overtrust* oder *complacency*, [27]). Der Großteil der bisherigen Forschungsarbeiten in diesem Kontext beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen von Vertrauen im Umgang mit Adaptive Cruise Control (ACC; auf Deutsch: adaptive Geschwindigkeitsregelung). Ein gewisses Maß an Vertrauen kann dabei bereits eine wichtige Voraussetzung für die Nutzungsbereitschaft von Fahrerassistenzsystemen sein [28]. Kazi et al. [29] untersuchten in einer Längsschnittstudie im Fahr Simulator den Einfluss der Zuverlässigkeit von ACC auf das wahrgenommene Vertrauen in diese Systeme. Die Ergebnisse zeigen eine Vertrauenszunahme bei zuverlässigen Systemen im Verlauf der Zeit, die jedoch nicht im Verhältnis zur objektiven Zuverlässigkeit der Automation stand. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Koustanai et al. [30], die durch die systematische Graduierung des Erfahrungsstandes im Umgang mit Auffahrwarnsystemen Veränderungen im Verhalten und im Vertrauen untersuchten. Die Teilnehmergruppe mit dem höchsten Erfahrungsstand hatte im Simulator keine Unfälle und reagierte in kritischen Situationen angemessener als die Fahrer mit geringerem Erfahrungsniveau. Ebenso stand der Grad der Systemerfahrung im positiven Zusammenhang mit dem geäußerten Vertrauen, jedoch ohne die Akzeptanz der Automation zu beeinflussen. Im Kontrast zu diesen Befunden stehen die Ergebnisse mehrerer Studien, die keine signifikanten Veränderungen des Vertrauens in ACC durch wiederholte Nutzung feststellen konnten (vgl. z. B. [31, 32]). Ursachen dieser inkonsistenten Ergebnisse könnten moderierende Faktoren sein, die in jüngsten Arbeiten betrachtet wurden. Flemisch et al. [33] und Beggiano et al. [34] heben in diesem Kontext die Bedeutung übereinstimmender (bereits vorab ausgebildeter) mentaler Modelle über die Funktionsweise der jeweiligen Automation hervor. Noch einen Schritt weiter gehen Verberne et al. [35] und Waytz et al. [36]. Auf der Basis experimenteller Studien zeigen sie, dass geteilte Intentionen und Bedürfnisse zwischen Mensch und Maschine bzw. anthropomorphe Eigenschaften der Automation weitere wichtige Einflussfaktoren für die Ausbildung angemessenen Vertrauens in automatisierte Systeme darstellen können.

Das Führen eines Fahrzeugs verlangt vom Fahrer eine große Spannbreite an Kompetenzen und Fertigkeiten sowohl auf perzeptuell-motorischer Ebene (z. B. Lenken, Schalten etc.), als auch auf kognitiver Ebene (z. B. Entscheidungen treffen, Aufmerksamkeit selektiv richten etc.). Die automatisierte Ausführung dieser Aufgaben kann zum Verlust dieser Kompetenzen führen und gleichzeitig die Abhängigkeit vom technischen System erhöhen [37]. Die grundsätzliche Brisanz des Themas wird anhand einer aktuellen Sicherheitsmitteilung der Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten (Federal Aviation Administration, [38]) deutlich. Darin werden Piloten aufgefordert, häufiger den manuellen Flugmodus anstatt den Autopiloten zu wählen, da der Kompetenzverlust ein zunehmendes Sicherheitsrisiko für die Luftfahrt darstellt. Obgleich nach Kenntnis des Autors aktuell keine longitudinale Fehlstudien zu den Problemen des Fertikeitsverlusts in (teil-)automatisierten Fahrzeugen vorliegen, „deuten die Ergebnisse erster Untersuchungen im Fahr-simulator darauf hin (z.B. [68],“ dass diese Effekte auch im Kontext der Fahrzeugautomatisierung auftreten. Adaptive oder kooperative Automatisierungskonzepte bieten die Möglichkeit, derartigen Problemen entgegenzuwirken und bis zur Realisierung vollständig autonomer Fahrzeuge wichtige Kompetenzen der Fahrer weiterhin aufrechtzuerhalten.

Der Fähigkeit, komplexe und dynamische Fahrsituationen richtig wahrzunehmen und zu interpretieren, liegt eine Reihe von kognitiven Prozessen (z. B. Aufmerksamkeit, Gedächtnis, mentale Modelle) zugrunde [12]. Monotone Überwachungsaufgaben oder die Ablenkung durch andere Tätigkeiten (z. B. Telefonieren) können dazu führen, dass diese Prozesse nicht mehr in ausreichendem Maße für das Situationsbewusstsein im Fahrzeug zur Verfügung stehen. Diese Effekte können bereits durch die Nutzung von Systemen mit niedrigem Automatisierungsgrad wie Adaptive Cruise Control (ACC) auftreten. Buld et al. [39] konnten zeigen, dass Fahrer während der Nutzung von ACC einige Aspekte der Fahraufgabe und Umgebungsbedingungen vernachlässigten und in Folge die Systemgrenzen falsch interpretierten. Verschlechterte Spurhaltung und verspätete Reaktion auf kritische Ereignisse wurden in einer Untersuchung von Ward [40] als Indikatoren reduzierten Situationsbewusstseins beim Fahren mit ACC interpretiert. Die Analysen von Ma und Kaper [41] deuten jedoch darauf hin, dass sich das Situationsbewusstsein infolge der Nutzung von ACC auch verbessern kann. Ein differenzierteres Bild dieser widersprüchlichen Ergebnisse liefern aktuelle Studien zu den Folgen hochautomatisierten Fahrens. Merat et al. [42] haben in einer Simulationsstudie die Effekte der Ausführung einer Nebenaufgabe auf das Fahrverhalten automatisierter Fahrt untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Reaktionen auf kritische Ereignisse unter der hochautomatisierten und der manuellen Fahrbedingung ohne Nebentätigkeit vergleichbar waren. Während hingegen die Ablenkung durch Nebentätigkeiten dazu führte, dass nach der manuellen Übernahme der automatisierten Fahrt deutlich höhere Geschwindigkeiten gefahren wurden. Die Autoren führen die Ergebnisse auf das reduzierte Situationsbewusstsein zurück, das durch die nebentätigkeitsbedingte Aufmerksamkeitsverschiebung verursacht wird.

Die hier dargestellten Problembereiche stellen nur einen Ausschnitt der zu lösenden Herausforderungen im Zusammenspiel zwischen Mensch und automatisiertem Fahrzeug dar. Viele Fragen hinsichtlich der mentalen Anpassungen und Veränderungen werden erst durch konkrete technische Umsetzung und wissenschaftliche Untersuchung der nächst

höheren Stufen der Fahrzeugautomatisierung (vgl. Automatisierungsstufen BASt, [43]) zu beantworten sein. Die Gestaltung von Schnittstellen, geeignetes Feedback oder die Vermeidung von Verantwortungsdiffusion sind Themenfelder, die bereits heute in neuen Gestaltungskonzepten adressiert werden und auf Prototypenbasis für hochautomatisierte Fahrzeuge umgesetzt wurden (vgl. z. B. [44]). Welche Lernerfahrungen, Wechselwirkungen und Veränderungen mentaler Modelle sich jedoch langfristig durch die Nutzung dieser Systeme ergeben, kann erst durch repräsentative, longitudinale Untersuchungen geklärt werden.

6.3 Mentale Modelle autonomen Fahrens

6.3.1 Was sind mentale Modelle?

Als mentale Modelle werden kognitiv-emotionale Repräsentationen von Objekten, Objektbeziehungen und Prozessen – kurz: innere Repräsentationen der externen Welt – bezeichnet. Der Begriff des mentalen Modells wurde erstmals von dem Psychologen Kenneth Craik [45] verwendet, der die Annahme formulierte, dass Menschen in ihrem Geist vereinfachte Modelle über die Funktionen und Abläufe ihrer Umwelt entwickeln. Die Modelle dienen der Orientierung, dem Verständnis, dem Schlussfolgern sowie der Vorhersage von Ereignissen. Craiks Ansatz der mentalen Modelle wurde später von Johnson-Laird [46] zur Beschreibung und Untersuchung von schlussfolgerndem Denken und Sprachverstehen weiterentwickelt.

In der Literatur der Kognitionspsychologie besteht weitgehend Konsens darüber (vgl. [47]), dass mentale Modelle dynamischer Natur sind und sich durch drei zentrale Eigenschaften beschreiben lassen.

1. Mentale Modelle werden im Arbeitsgedächtnis erstellt und ermöglichen Individuen, Handlungsmöglichkeiten und ihre Folgen zu simulieren [1]. Denken ist somit die Manipulation von mentalen Modellen.
2. Mentale Modelle können Ursache und Wirkungszusammenhänge repräsentieren. Sie generieren ein kausales Verständnis darüber, wie Systeme funktionieren [48].
3. Mentale Modelle können sich durch Erfahrungen im Verlauf der Zeit verändern – d. h., sie sind lernfähig.

Die Qualität der Modelle und die der darauf basierenden Schlussfolgerungen entwickeln sich durch spezifische Lernerfahrungen weiter [49]. Mit zunehmender Expertise entwickelt sich das Verständnis von Sachverhalten von konkreten hin zu abstrakten Repräsentationen – ein für die Mensch-Maschine-Interaktion relevanter Aspekt.

In den angewandten Forschungsbereichen wie der Technikgestaltung herrschen teilweise unterschiedliche Auffassungen über die Definition mentaler Modelle (vgl. [1]), die durch unterschiedliche Aufgabenkontexte erklärbar sind. Dennoch haben bereits frühere Arbeiten die Bedeutung des Konzeptes zur Vorhersage und zum Verständnis menschlichen Verhaltens im Umgang mit technischen Systemen verdeutlicht (vgl. z. B. [50]). Mentale

Modelle basieren demnach auf kontextspezifischen Erwartungen und Vorerfahrungen sowie auf der aktuellen Wahrnehmung der Systemeigenschaften. Sie stellen die Grundlage des Systemverständnisses und der Handlungsentscheidungen des Benutzers dar. Dies bedeutet, dass sowohl die fehlerfreie Nutzung als auch das Vertrauen in technische Systeme maßgeblich davon bestimmt wird, inwieweit die Funktionsweise der Maschine mit den Erwartungen der Nutzer kompatibel ist [33].

Die Kompatibilität im Kontext mentaler Modelle bezieht sich neben der Bedienbarkeit auch auf das Nutzererleben sowie die allgemeine Technikakzeptanz. Zhang und Xu [51] postulieren in diesem Zusammenhang eine Modifizierung oder Restrukturierung bestehender mentaler Modelle bei der Einführung und Nutzung neuer Technologien. Mangelnde Kompatibilität kann zur Frustration führen und beeinflusst folglich Akzeptanz- und Diffusionsraten negativ [52]. Entsprechen hingegen neue Systeme den Erwartungen (d. h. den bestehenden mentalen Modellen), hat dies gesteigertes Systemvertrauen und positives Nutzererleben zur Folge [53].

Mentale Modelle umfassen folglich Repräsentationen menschlichen Wissens, Einstellungen sowie Werte und Emotionen, die in Wechselwirkung mit ihrer Umwelt stehen. Im Themenfeld der Automatisierung von Fahrzeugen sind sowohl die kognitionspsychologischen Prozesse der Informationsverarbeitung als auch der Einfluss höherer mentaler Strukturen (z. B. Bedürfnisse, Erwartungen, Wünsche etc.) von Bedeutung. Die Interdependenz dieser unterschiedlichen Ebenen wurde bereits in theoretischen Modellen über die Rolle des Fahrers in automatisierten Fahrzeugen verdeutlicht (vgl. z. B. [54, 55]). Letztendlich wird die geeignete Modifikation und Anpassung der mentalen Modelle den Umgang mit automatisierten Fahrzeugen, die Nutzungshäufigkeit sowie die Akzeptanz dieser Systeme maßgeblich bestimmen. Der erfolgreiche – noch zu definierende – Rollenwandel des Fahrers im automatisierten Fahrzeug bedarf somit einer integrativen Betrachtung der vorliegenden Ergebnisse zu menschlichem Verhalten in teil- und hochautomatisierten Systemen sowie der aktuellen Vorstellungen und Bedürfnisse gegenüber vollautomatisierten Fahrzeugen. Oder anders gesagt, menschenzentrierte Technikgestaltung impliziert nicht nur die Betrachtung der technischen Möglichkeiten und Grenzen, sondern auch die Orientierung an individuellen und gesellschaftlichen Wertevorstellungen und Zielen.

6.3.2 Onlineumfrage

Für viele Menschen sind autonome Fahrzeuge noch eine ferne Zukunftsvision. Auch wenn sich manche bereits vorgestellt haben mögen, wie attraktiv es wäre, während der Autofahrt zu schlafen oder Zeitung zu lesen, ist das Wissen über autonome Fahrzeuge in der breiten Bevölkerung noch begrenzt. Entscheidungen über die Nutzung und Akzeptanz von Innovationen basieren jedoch nicht ausschließlich auf rationalem Wissen [56]. Entgegen dem Menschenbild des rationalen, nutzenmaximierenden Entscheiders – dem *homo oeconomicus* – bedienen sich Menschen vielmehr einfacher Entscheidungsstrategien, welche die zu verarbeitende Informationsmenge reduzieren und von emotionalen Prozessen beein-

flusst werden [57, 58, 59]. Einstellungen und Entscheidungen sind nicht beliebig durch die Bereitstellungen von Informationen veränderbar. Vielmehr werden neue Informationen selektiv aufgenommen und verarbeitet, sodass sie im Einklang mit den bestehenden Wünschen, Erwartungen und Zielen – den mentalen Modellen der Menschen – stehen [60]. Für den Erfolg einer Innovation ist es folglich entscheidend, dass nicht nur deren kognitive Wahrnehmungen und Bewertungen in bestehende mentale Modelle integrierbar, sondern auch emotional anschlussfähig sind [61, 62].

Neben einer Vielzahl von Studien zu den technischen, rechtlichen und kognitiven Aspekten der Automatisierung von Fahrzeugen existieren bislang nur wenige Untersuchungen, die sich mit den Präferenzen und Erwartungen potenzieller Nutzer auseinandersetzen. In der bislang größten repräsentativen internationalen Erhebung zu dem Thema [63] standen insbesondere die Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft automatisierter Fahrzeuge im Fokus des Interesses. Die Ergebnisse zeigen für Deutschland, dass automatisierte Fahrzeuge mehrheitlich als nützlicher technischer Fortschritt erachtet werden. Dagegen äußert gleichzeitig die Hälfte der Teilnehmer Angst gegenüber dem automatisierten Fahren und bezweifelt, dass die Technologie zuverlässig funktionieren wird. Im Vergleich mehrerer Nutzungsszenarien werden insbesondere lange Autobahnfahrten als bevorzugte Einsatzmöglichkeit des autonomen Fahrens genannt. Interessanterweise finden die Autoren einen positiven Zusammenhang zwischen der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen und der Akzeptanz gegenüber dem automatisierten Fahren. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass die Ausbildung geeigneter mentaler Modelle zu den Eigenschaften teilautomatisierter Systeme auch das Akzeptanzniveau für höhere Automatisierungsstufen positiv beeinflussen (vgl. [34]).

Welche Einstellungen sowie kognitiven und emotionalen Repräsentationen der Akzeptanz oder Ablehnung automatisierter Fahrzeuge zugrunde liegen, ist bislang unbekannt. In Ergänzung zu den oben dargelegten kognitionspsychologischen Anforderungen an die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion stellen diese jedoch eine wichtige Voraussetzung für das Gelingen der Transformation im Verkehrssektor dar. Ziel der hier dargestellten repräsentativen Onlinefragebogenstudie war es, ein differenziertes, teilweise exploratives Bild der Wahrnehmungen des autonomen Fahrens über die in dem Projekt entwickelten Use-Cases hinweg zu generieren. Der Fragebogen wurde unter den folgenden Leitfragen entwickelt:

- „Mit welchen mentalen Modellen begegnen potenzielle Nutzer der neuen Rolle des Fahrers im autonomen Fahrzeug?“
- „Welche automatisierten Elemente der Fahrzeugsteuerung sind am ehesten an die mentalen Modelle der Nutzer anschlussfähig?“
- „Welche Kontrollfunktionen und Interventionsmöglichkeiten des Fahrers erwarten potenzielle Nutzer im autonomen Fahrzeug bzw. können die Akzeptanz des Innovationsfeldes steigern?“
- „Welche Erlebnis- und Gestaltungselemente in automatisierten Fahrzeugen können bisherige Repräsentationen zur Rolle des Fahrers substituieren und somit die Akzeptanz des Innovationsfeldes steigern?“

6.3.3 Methoden

6.3.3.1 Fragebogen

Der Fragebogen wurde in Zusammenarbeit mit weiteren Autorinnen dieses Buches (Rita Cyganski, s. Kap. 12 sowie Eva Fraedrich und Barbara Lenz, s. Kap. 29) konzipiert. Die Erhebung erfolgte internetbasiert im April 2014 über einen elektronischen Fragebogen. Der Fragebogen war in zwei Hauptabschnitte unterteilt:

1. Allgemeiner Teil: Dieser Bereich bestand aus fünf Fragengruppen, die Fragen zur Soziodemografie, zu den Vorkenntnissen, dem Interesse und der allgemeinen Akzeptanz automatisierten Fahrens, zu bedürfnisbezogenen Einstellungen bezüglich unterschiedlicher Verkehrsmittel, zu den emotionalen Repräsentationen mobilitätsbezogener Begriffe sowie den Themen der Zeitnutzung und zur allgemeinen Verkehrsmittelnutzung umfassen.
2. Spezieller Teil: Die Fragen in diesem Teil bezogen sich auf die im Projekt entwickelten vier Nutzungsszenarien (sogenannte Use-Cases, s. Kap. 2) und waren jeweils in folgende zehn Themengruppen unterteilt: freie Assoziationen zu dem Nutzungsszenario, Nutzungsbereitschaft, antizipierter Wegzweck, antizipierter Einfluss auf bisherige Verkehrsmittelnutzung, angenommene Bedürfniserfüllung, emotionale Reaktionen, Vertrauen und Akzeptanz, Kontroll- und Interventionsbedürfnisse sowie bevorzugte Nebenaufgaben während der automatisierten Fahrt.

Zur Reduzierung der Bearbeitungszeit wurden die Fragen zu den vier unterschiedlichen Use-Cases (s. unten 6.3.2.2–6.3.2.4) im zweiten Teil nicht von jedem Teilnehmer beantwortet. Nach der Beantwortung der Fragen im ersten Teil wurde das Sample gesplittet und die Studienteilnehmer zufällig und zu gleichen Teilen (jeweils $n = 250$) einem der vier Nutzungsszenarien zugewiesen. Insgesamt umfasste der Fragebogen 438 Items, wobei durch die Aufteilung der Use-Cases von jedem Teilnehmer 210 Fragen beantwortet wurden. Die Items wurden zum Teil aus früheren Mobilitätserhebungen [62, 64] übernommen bzw. neu entwickelt und – insbesondere die Fragen des zweiten Teils – in einem Pretest auf Verständlichkeit geprüft.

Bei allen Einstellungsfragen wurde der Grad der Zustimmung über eine sechsstufige Skala (1 = *trifft überhaupt nicht zu*, 6 = *trifft voll und ganz zu*; bei einigen Fragen weichen diese Codes aus inhaltlichen Gründen ab) erfasst. Die affektive Bedeutung der Begriffe im Themenfeld Mobilität wurde mit der Methode des semantischen Differenzials erhoben [65]. In den drei Dimensionen Valenz, Potenz und Erregung wurden dazu jeweils bipolare, neunstufige (von -4 = *äußerst* über 0 = *neutral* bis zu 4 = *äußerst*) Skalen verwendet, die an den Endpunkten mit den Adjektiven *unangenehm* – *angenehm* (Valenz), *schwach* – *mächtig* (Potenz) und *beruhigend* – *aufregend* (Erregung) gekennzeichnet waren. Das aktuelle Verkehrsverhalten wurde über Auswahloptionen bzw. Häufigkeitskategorien erfasst.

6.3.3.2 Stichprobe

Die Teilnehmer der Befragung wurden über ein kommerzielles Marktforschungspanel der Firma Respondi AG rekrutiert (<http://www.respondi.com/de/>) und von dieser für ihr Mitwirken finanziell entlohnt. Von dem Unternehmen wurde eine für die gesamtdeutsche Bevölkerung repräsentative Zusammensetzung hinsichtlich Alter, Geschlecht, Bildung und Einkommen zugesichert. Insgesamt haben $n = 1363$ Personen den Fragebogen vollständig ausgefüllt. Einige Personen beantworteten die Fragen jedoch in so kurzer Zeit, dass ihre Gewissenhaftigkeit in Zweifel gezogen werden muss. Folglich wurden die Daten all jener Teilnehmer, deren Bearbeitungszeit unter 1000 Sekunden lag, in den weiteren Analysen nicht weiter berücksichtigt. Das Sample reduzierte sich somit um $n = 230$ auf $n = 1133$. In einem weiteren Schritt wurden infolge der sich daraus ergebenden Quotenverzerrung $n = 133$ weibliche Personen zufällig aus den Datensatz entfernt, um eine annähernd repräsentative Verteilung zumindest in der Geschlechterquote zu erreichen. Die mittlere Bearbeitungszeit der verbleibenden Stichprobe ($n = 1000$) lag bei 1897 Sekunden (= 31,6 Minuten) ($SD = 780$ Sekunden). Tabelle 6.1 ist die genaue demografische Zusammensetzung des Samples zu entnehmen.

6.3.3.3 Datenanalyse affektive Ähnlichkeit

Die affektive Ähnlichkeit zwischen den mittels semantischen Differenzials bewerteten Begrifflichkeiten wurde durch die dreidimensionale euklidische Distanz zwischen dem gemittelten EPA-Profil ($E = \text{Valenz}$, $P = \text{Potenz}$, $A = \text{Erregung}$) des Begriffes „Ideale Fahrt“ und den gemittelten EPA-Profilen der übrigen Begriffe in folgender Weise berechnet:

$$d = \sqrt{(I_e - B_e)^2 + (I_p - B_p)^2 + (I_a - B_a)^2},$$

wobei I die Bewertung der „Idealen Fahrt“ bezeichnet, B die jeweilige Bewertung der übrigen Begriffe und die tiefgestellten Buchstaben die EPA-Dimensionen festlegen.

6.3.4 Ergebnisse

Zunächst interessierte, inwieweit das Thema „Autonomes Fahren“ in der Bevölkerung überhaupt bekannt ist, ob es auf breites Interesse stößt und wie die Technologie spontan beurteilt wird. Weniger als die Hälfte der Befragten (44 Prozent) gab an, keine Kenntnisse von dem Thema zu haben, während die Mehrheit bereits von dem Thema gehört (33 Prozent), darüber gelesen hat (16 Prozent) oder nach eigenen Angaben über ein höheres Kompetenzniveau (4 Prozent) verfügt. Eine ähnliche Verteilung zeigt sich auch hinsichtlich des Interesses am Thema „Autonomes Fahren“. Die Teilnehmer äußerten mehrheitlich (58 Prozent) „leichtes“, „überwiegendes“ oder „starkes“ Interesse an dem Thema, während jedoch die Mehrheit (56 Prozent) sich grundsätzlich nicht vorstellen kann, das eigene bislang bevorzugte Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen. Trotz überwiegenden Interesses und einiger Vorkenntnisse besteht also bei einem Großteil der Be-

Tab. 6.1 Demografische und mobilitätsspezifische Merkmale der Stichprobe

Merkmale		
Demografie		
Geschlecht	weiblich	55,5%
Alter	18–29 Jahre	8,8%
	30–49 Jahre	33,6%
	50–64 Jahre	31,7%
	65 + Jahre	25,9%
Bildung	keine Schulausbildung	1,1%
	Volks-/Hauptschulabschluss	39,4%
	Mittlere Reife/Realschulabschluss	29,5%
	Abitur oder Fachhochschulreife	30,0%
Einkommen	unter 900 Euro pro Monat	6,6%
	900 bis unter 1500 Euro pro Monat	17,5%
	1500 bis unter 2000 Euro pro Monat	15,2%
	2000 bis unter 2600 Euro pro Monat	14,4%
	2600 bis unter 3600 Euro pro Monat	18,6%
	mehr als 3600 Euro pro Monat	27,7%
Mobilität		
Führerschein	ja	89,8%
PKW-Anzahl im Haushalt	kein Auto	12,6%
	1 Auto	51,8%
	2 Autos	28,8%
	3 und mehr Autos	6,8%
Täglich genutztes Verkehrsmittel	Auto	55,0%
	öffentlicher Nahverkehr	13,7%
	Carsharing	0,4%
	Fahrrad	10,7%

völkerung eine gewisse Zurückhaltung hinsichtlich der Nutzungsbereitschaft autonomer Fahrzeuge.

6.3.4.1 Fahrerassistenzsysteme und Abgabe von Fahraufgaben

Wie bereits oben dargestellt, kann die Nutzung und Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen einen positiven Effekt auf die generelle Wahrnehmung des autonomen Fahrens haben. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass ein Großteil der Befragten (67 Prozent) bereits von Fahrerassistenzsystemen gehört hat. Unter den Personen, die im

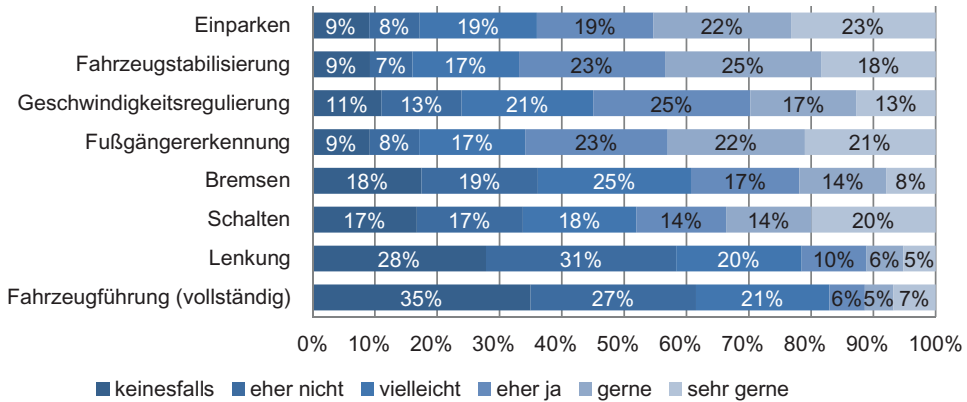


Abb. 6.1 Bedürfnis der Funktionsabgabe an ein automatisiertes System

Alltag einen Pkw nutzen (82 Prozent), wird am häufigsten der Tempomat (50 Prozent), die akustische Einparkhilfe (46 Prozent) und der Fernlichtassistent (22 Prozent) eingesetzt. Die übrigen Systeme wie Abstandsregeltempomat (ACC, 15 Prozent), Nachtsichtassistent (11 Prozent), Head-up-Display (10 Prozent) oder Müdigkeitsassistent (8 Prozent) werden nur von einer Minderheit im Alltag genutzt.

Die Bedürfnisse, bestimmte Fahraufgaben und -funktionen an ein automatisiertes System abzugeben, weisen ein ähnliches Bild auf. Abbildung 6.1 zeigt die aufgabenspezifische Verteilung der Bedürfnisse in dem Kategorienspektrum von „keinesfalls“ bis „sehr gerne“. Im Vergleich der unterschiedlichen Fahraufgaben wird deutlich, dass neben der überwiegenden Ablehnung (62 Prozent in den Kategorien „keinesfalls“ und „eher nicht“), die vollständige Fahrzeugführung an einen Fahrroboter abzugeben, insbesondere die Lenkung des Fahrzeugs (58,3 Prozent in den Kategorien „keinesfalls“ und „eher nicht“), ungern an ein automatisiertes System delegiert wird. Während die Übertragung von Einparkaufgaben (45 Prozent in den Kategorien „gerne“ und „sehr gerne“) sowie sicherheitsrelevanter Assistenzen im Bereich der Fahrzeugstabilisierung (43 Prozent in den Kategorien „gerne“ und „sehr gerne“) und der Fußgängererkennung (43 Prozent in den Kategorien „gerne“ und „sehr gerne“) präferiert werden.

6.3.4.2 Repräsentationen der Fahrerrolle und Nutzungsszenarien

Auf der Basis des semantischen Differenzials wurden unter allen Teilnehmern die affektiven Bedeutungen unterschiedlicher Begriffe, die sich einerseits auf unterschiedliche Rollen im Fahrzeug und andererseits auf die in den Use-Cases beschriebenen Nutzungsszenarien beziehen, erhoben. Außerdem wurde der Begriff der „Idealen Fahrt“ und das konventionelle „Auto“ in dieser Art bewertet. Die Rohergebnisse (durchschnittliche Bewertungen auf den Skalen Valenz, Potenz und Aktivierung) sind in Tab. 6.2 dargestellt.

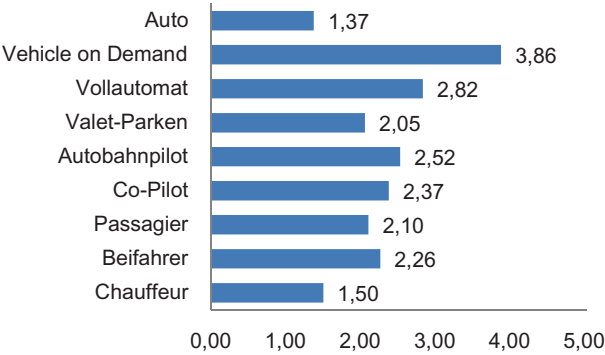
Die Ergebnisse wurden genutzt, um die euklidischen Distanzen und somit deren affektive Ähnlichkeit zwischen dem Begriff der „Idealen Fahrt“ und den übrigen Begriffen zu

Tab. 6.2 Arithmetisches Mittel (*M*) der affektiven Bewertungen

Begriff	Valenz	Potenz	Erregung
<i>Chauffeur</i>	1,26	0,80	−0,05
<i>Beifahrer</i>	0,89	−0,06	0,07
<i>Passagier</i>	0,95	0,15	0,10
<i>Co-Pilot</i>	0,61	0,34	0,37
<i>Fahrzeug mit Autobahnpiilot</i>	0,54	0,68	0,86
<i>Fahrzeug mit Valet-Parken</i>	0,93	0,89	0,68
<i>Vollautomatisiertes Fahrzeug</i>	0,26	0,68	1,00
<i>Vehicle-on-Demand</i>	−0,69	−0,05	1,04
<i>Auto</i>	2,23	1,65	0,85
<i>Ideale Fahrt</i>	2,69	1,30	−0,42

berechnen (für methodische Details (s. [61, 66])). Eine Visualisierung dieser Berechnungen bietet Abb. 6.2, in der auf der x-Achse die euklidische Distanz der bewerteten Begriffe abgebildet ist. Niedrige Werte indizieren eine geringere Distanz und somit höhere affektive Ähnlichkeit zwischen den Begriffen, d. h., sie lösen eine stärkere positive Assoziation bei den Befragten aus. Deutlich erkennbar ist, dass der „Chauffeur“ der „Idealen Fahrt“ affektiv am nächsten kommt, wobei der „Co-Pilot“ am wenigsten dieser emotionalen Repräsentation entspricht. Im Vergleich der unterschiedlichen Use-Cases des autonomen Fahrens wird sichtbar, dass das Vehicle-on-Demand deutlich von den Empfindungen für eine ideale Fahrt abweicht, wohingegen Fahrzeuge mit Valet-Parken am ehesten damit assoziiert sind. Die im Vergleich zu den Use-Cases deutlich positivere affektive Verankerung konventioneller Autos kann folglich ein wesentliches Akzeptanzhemmnis für die Einführung insbesondere vollautomatisierter Fahrzeuge darstellen. In Bezug auf die Rolle des Fahrers unterstreichen die gefundenen affektiven Repräsentationen die in einer weiteren Frage explizit adressierte Rollenpräferenz. Die Teilnehmer gaben bei diesem Item mittels Schie-

Abb. 6.2 Euklidische Distanzen zur affektiven Repräsentation der „Idealen Fahrt“



bereglter (1 = Passagier und 10 = Überwacher) an, welche Rolle sie im autonomen Fahrzeug einnehmen wollen. Der arithmetische Mittelwert von 6,36 ($SD = 2,9$) vermittelt eine Präferenz für die Rolle des aktiven Überwachers, dem fortwährend die Kontrolle des Fahrzeugs auf der Basis von stetig verfügbaren Systeminformationen ermöglicht wird. Die Rolle des passiven Passagiers ist auch auf affektiver Ebene ($d = 2,1$) noch sichtbar vom erwünschten Ideal ($d = 0$) entfernt.

6.3.4.3 Kognitive und emotionale Repräsentationen der Nutzungsszenarien

Wie oben beschrieben, wurde die Gesamtstichprobe in diesem Teil des Fragebogens zufallsbasiert in vier gleich große Untergruppen (jeweils $n = 250$) aufgeteilt und einem der vier Nutzungsszenarien (autonome Fahrzeuge mit Autobahnpilot mit Verfügbarkeitsfahrer (1), mit Valet-Parken (2), vollautomatisierte Fahrzeuge mit Verfügbarkeitsfahrer (2) und Vehicle-on-Demand (4)) zugewiesen. Dies ermöglichte einen Intergruppenvergleich der Erwartungen und Einstellungen gegenüber den einzelnen Szenarien. Zu Beginn dieses Abschnitts wurden die Teilnehmer nach der Nutzungsbereitschaft der jeweils kurz beschriebenen Varianten des autonomen Fahrens gefragt. Autonome Fahrzeuge mit Valet-Parken finden die meiste Zustimmung (53 Prozent), gefolgt von vollautomatisierten Fahrzeugen mit Verfügbarkeitsfahrer (45 Prozent) und Fahrzeugen mit Autobahnpilot (42 Prozent). Die geringste Nutzungsabsicht wurde gegenüber dem Vehicle-on-Demand geäußert (35 Prozent). Die Unterschiede sind gemäß der durchgeführten einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) statistisch bedeutsam ($F(3,996) = 4,528; p < .01$). Der Bonferroni-Post-hoc-Test (paarweiser Mittelwertvergleich) zeigt jedoch an, dass sich lediglich die Use-Cases Valet-Parken und Vehicle-on-Demand in der Nutzungsabsicht signifikant unterscheiden ($p < .01$).

Auf die Frage, in welchem Umfang diverse Mobilitätsbedürfnisse durch die Nutzung eines autonomen Fahrzeugs erfüllt werden würden, zeigen sich teilweise unterschiedliche Einschätzungen im Vergleich der Szenarien. In Tab. 6.3 sind die Mittelwerte dieser Beurteilungen und statistische Resultate (ANOVA und Bonferroni-Post-hoc-Test) gegenübergestellt. In der Gesamtbetrachtung zeigt sich, dass autonome Fahrzeuge als komfortabel, stressfrei und umweltfreundlich wahrgenommen werden. Statistisch relevante Unterschiede im Vergleich der Use-Cases bestehen in puncto Stressfreiheit, Komfort, Sicherheit und Zeitersparnis. Valet-Parken adressiert dabei nach Einschätzung der Befragten die Bedürfnisse nach Zeitersparnis, Komfort, Stressfreiheit am effektivsten und erklärt somit die hohen Akzeptanzraten in dieser Variante autonomen Fahrens. Kritisch hervorzuheben sind die Sicherheitsbedenken beim Nutzungsszenario Vehicle-on-Demand.

Die emotionale Bewertung der Use-Cases erfolgte hinsichtlich zehn unterschiedlicher Emotionen (Hoffnung, Gelassenheit, Zufriedenheit, Freude, Besorgnis, Ärger, Stress, Machtlosigkeit, Abneigung, Angst). Die Teilnehmer waren dabei aufgefordert anzugeben, welche Emotionen sie bei der antizipierten Nutzung der jeweiligen Variante autonomen Fahrens empfinden. Die Ergebnisse (s. Tab. 6.4) bestätigen die Tendenzen der oben dargestellten Unterschiede im Vergleich der Use-Cases. Mit dem Valet-Parken sind die stärks-

Tab. 6.3 Arithmetisches Mittel (*M*) und Standardabweichung (*SD*) der Bedürfniserfüllung

	Auto- bahnpilot	Valet-Parken	Vollautomat	Vehicle- on-Demand	
Mobilitätsbedürfnis	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	F(3,996)
<i>Unabhängigkeit</i>	3,39 (1,44)	3,70 ₄ (1,46)	3,53 (1,47)	3,32 ₂ (1,57)	3,286*
<i>Stressfreiheit</i>	3,72 ₂ (1,55)	4,13 _{1,4} (1,43)	3,93 (1,50)	3,67 ₄ (1,79)	4,509**
<i>Komfort</i>	3,78 (1,42)	4,12 ₄ (1,39)	4,06 ₄ (1,38)	3,63 _{2,3} (1,58)	6,364**
<i>Niedrige Kosten</i>	3,45 (1,30)	3,35 (1,31)	3,24 (1,38)	3,55 (1,52)	2,336
<i>Umweltfreundlichkeit</i>	3,71 (1,30)	3,79 (1,29)	3,81 (1,32)	3,78 (1,50)	0,253
<i>Sicherheit</i>	3,48 (1,48)	3,55 (1,30)	3,66 ₄ (1,48)	1,22 ₃ (1,64)	4,014**
<i>Soziales Ansehen</i>	2,86 (1,39)	2,87 (1,35)	2,97 (1,38)	2,87 (1,49)	0,354
<i>Fahrerlebnis</i>	3,24 (1,43)	3,39 ₄ (1,34)	3,28 (1,42)	3,01 ₄ (1,57)	3,029*
<i>Geringer Zeitaufwand</i>	3,40 ₂ (1,37)	4,00 _{1,3,4} (1,40)	3,43 ₂ (1,39)	3,36 ₂ (1,52)	11,534**

Bemerkung: Die durch tiefer gestellte Zahlen markierten Mittelwerte weisen einen signifikanten Unterschied im Bonferroni-Post-hoc-Test (paarweiser Mittelwertvergleich) auf einem Niveau von $p = .05$ auf (z. B. tiefer gestellte 2 in der zweiten Zeile/ ersten Spalte indiziert einen signifikanten Unterschied zu dem entsprechenden Wert der zweiten Spalte)

** $p < .05$; ** $p < .01$*

ten positiven emotionalen Assoziationen verbunden. Die Gefühle Zufriedenheit, Gelassenheit und Freude sind signifikant stärker ausgeprägt als in den übrigen Szenarien. In den Szenarien Autobahnpilot, vollautomatisiertes Fahrzeug und Vehicle-on-Demand überwiegen die Empfindungen der Machtlosigkeit und der Angst. Das Gefühl, ausgeliefert zu sein, geht mit diesen Emotionen einher und stellt ein starkes Akzeptanzhindernis dar. Neben dem Valet-Parken evoziert lediglich das vollautomatisierte Fahrzeug überdurchschnittlich positive Emotionen wie Freude, Hoffnung und Zufriedenheit, obgleich die negativen Empfindungen in diesem Szenario überwiegen.

Diese Ergebnisse liefern ein differenziertes Bild der emotionalen Grundlagen, welche die wohl wichtigste Emotion im Kontext der Automatisierung konstituieren – das Vertrauen. Das Vertrauen in die beschriebenen Varianten des autonomen Fahrens wurde in dieser Befragung anhand von vier Items (z. B. „Ich kann mir vorstellen, mich in meiner Alltagsmobilität auf ein derartiges System zu verlassen“) gemessen – analog zu den übrigen Einstellungsisems auf einer sechsstufigen Likert-Skala. Aus diesen Items wurde ein Summenindex gebildet. Wie nicht anders zu erwarten, ist das Vertrauen in Fahrzeuge mit Valet-Parken ($M = 3,45$; $SD = 1,31$) am höchsten und gegenüber dem Vehicle-on-Demand am schwächsten ausgeprägt ($M = 3,10$; $SD = 1,42$). Der Vertrauen in Fahrzeuge mit Autobahnpilot und in vollautomatisierte Fahrzeuge befindet sich auf annähernd gleichem Niveau ($M = 3,36$; $SD = 1,33$ zu $M = 3,28$; $SD = 1,33$). Statistisch bedeutsam sind lediglich die Unterschiede zwischen dem Szenario Valet-Parken und Vehicle-on-Demand (Bonferroni-Post-hoc-Test, $p < .05$).

Tab. 6.4 Arithmetisches Mittel (*M*) und Standardabweichung (*SD*) der emotionalen Empfindungen

	Auto- bahnpilot	Valet-Parken	Vollautomat	Vehicle- on-Demand	
<i>Emotion</i>	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	F(3,996)
<i>Hoffnung</i>	3,04 (1,30)	3,16 (1,35)	3,23 (1,32)	3,00 (1,39)	1,504
<i>Gelassenheit</i>	3,12 (1,45)	3,44 ₄ (1,40)	3,22 (1,33)	3,06 ₂ (1,49)	3,482**
<i>Zufriedenheit</i>	3,25 (1,44)	3,52 ₄ (1,48)	3,35 (1,33)	3,09 ₂ (1,49)	4,024**
<i>Freude</i>	3,07 (1,44)	3,43 ₄ (1,42)	3,30 (1,33)	3,06 ₂ (1,44)	4,135**
<i>Besorgnis</i>	3,50 ₂ (1,47)	2,97 _{1,3,4} (1,49)	3,54 ₂ (1,43)	3,52 ₂ (1,63)	8,474**
<i>Ärger</i>	2,66 (1,34)	2,49 (1,37)	2,75 (1,34)	2,79 (1,45)	2,371
<i>Stress</i>	3,04 ₂ (1,52)	2,57 _{1,3,4} (1,36)	3,10 ₂ (1,43)	3,04 ₂ (1,59)	7,028**
<i>Machtlosigkeit</i>	3,72 ₂ (1,59)	3,04 _{1,3,4} (1,51)	3,63 ₂ (1,45)	3,82 ₂ (1,67)	12,770**
<i>Abneigung</i>	3,23 ₂ (1,61)	2,75 _{1,3,4} (1,55)	3,27 ₂ (1,55)	3,35 ₂ (1,72)	7,075**
<i>Angst</i>	3,39 ₂ (1,57)	2,68 _{1,3,4} (1,40)	3,24 ₂ (1,43)	3,37 ₂ (1,65)	12,075**

Bemerkung: Die durch tiefergestellte Zahlen markierten Mittelwerte weisen einen signifikanten Unterschied im Bonferroni-Post-hoc-Test (paarweiser Mittelwertvergleich) auf einem Niveau von $p = .05$ auf (z. B. tiefergestellte 4 in der zweiten Zeile/ zweiten Spalte indiziert einen signifikanten Unterschied zu dem entsprechenden Wert der vierten Spalte).

* $p < .05$; ** $p < .01$

6.3.4.4 Interventions-, Kontroll- und Erlebnisbedürfnisse

Für die deutliche Mehrheit der befragten Personen (Autobahnpilot: 82 Prozent; Valet Parken: 81 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 88 Prozent; Vehicle-on-Demand: 84 Prozent) ist die Möglichkeit, jederzeit die manuelle Kontrolle über das Fahrzeug wieder übernehmen bzw. den automatisierten Fahrvorgang abbrechen zu können, eines der zentralen Bedürfnisse. Gleichzeitig will nur eine Minderheit in den Szenarien mit Verfügbarkeitsfahrer (Autobahnpilot: 32 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 48 Prozent) die Aufmerksamkeit nicht mehr auf den Verkehr richten und dem automatisierten System vollständig die Fahrzeugkontrolle überlassen. Dies spiegelt sich auch in dem für diese beiden Use-Cases mehrheitlich geäußerten Bedürfnis wider, die im Fahrzeug übliche Sitzposition während der automatisierten Fahrt nicht verlassen zu wollen (Autobahnpilot: 76 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 79 Prozent). In allen vier Szenarien formuliert die überwiegende Anzahl der Teilnehmer den Wunsch, die Automation gemäß der eigenen Präferenzen hinsichtlich Fahrstil (z. B. komfortabel vs. sportlich) oder Streckenauswahl (z. B. zeiteffizient vs. umweltfreundlich) anpassen zu können (Autobahnpilot: 71 Prozent; Valet-Parken: 76 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 72 Prozent; Vehicle-on-Demand: 82 Prozent).

Als wichtigster Vorteil der Nutzung autonomer Fahrzeuge wird die Möglichkeit erachtet, während der Fahrt die Landschaft genießen zu können (Autobahnpilot: 64 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 72 Prozent; Vehicle-on-Demand: 72 Prozent; Valet-Parken: o. A.). Weiterhin wird die Option, sich ungestört mit den Fahrzeuginsassen unterhalten zu können,

als sehr positiv wahrgenommen (Autobahnpilot: 63 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 65 Prozent; Vehicle-on-Demand: 68 Prozent; Valet-Parken: o. A.). Erstaunlicherweise werden Tätigkeiten wie Internetsurfen (Autobahnpilot: 28 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 39 Prozent; Vehicle-on-Demand: 46 Prozent; Valet-Parken: o. A.), Filme ansehen (Autobahnpilot: 23 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 32 Prozent; Vehicle-on-Demand: 36 Prozent; Valet-Parken: o. A.), Arbeiten (Autobahnpilot: 22 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 33 Prozent; Vehicle-on-Demand: 36,4 Prozent; Valet-Parken: o. A.) oder Entspannen bzw. Schlafen (Autobahnpilot: 31 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 47 Prozent; Vehicle-on-Demand: 54 Prozent; Valet-Parken: o. A.) nur von einer Minderheit als positiver Aspekt des automatisierten Fahrens betrachtet. Als wichtigste Vorteile des Valet-Parkens werden die Entlastung bei der Parkplatzsuche (80 Prozent), die Sicherheit des Parkortes (78 Prozent), die entstehende frei verfügbare Zeit (76 Prozent) sowie die günstigeren Parkplatzooptionen außerhalb der Innenstädte wahrgenommen (76 Prozent).

6.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Interaktion zwischen Mensch und autonomem Fahrzeug stand im vorliegenden Beitrag im Fokus des Interesses. Vor dem Hintergrund der Annahme, dass automatisierte Fahrzeuge in absehbarer Zukunft immer noch auf die Verfügbarkeit und Kontrolle des Menschen angewiesen sein werden, wurden zunächst die kognitionspsychologischen Auswirkungen der Mensch-Maschine-Interaktion betrachtet. Im Weiteren wurde im Rahmen einer umfangreichen Onlinebefragung die Nutzerperspektive des autonomen Fahrens empirisch untersucht. Das besondere Augenmerk galt dabei den Einstellungen, Erwartungen und Emotionen – den mentalen Modellen – gegenüber dem Thema des autonomen Fahrens.

Aus den Forschungsergebnissen zu den psychologischen Folgen der Automatisierung in unterschiedlichen Domänen (z.B. Luftfahrt, Produktion) ist zu schließen, dass der Mensch auf dem Weg zum vollautomatisierten Fahrzeug noch stärker ins Zentrum der Aufmerksamkeit von Gestaltern und Entwicklern rücken muss. Bereits bei den heute verfügbaren teilautomatisierten Systemen zeigen sich bei Fahrern bekannte Probleme wie unangemessenes Vertrauen und reduziertes Situationsbewusstsein. Welche Auswirkungen höhere Automatisierungsgrade und die damit verbundene, länger währende mentale Entkoppelung langfristig auf die kognitiven und motorischen Fähigkeiten des Fahrers haben werden, ist noch weitestgehend unbekannt. Die diesbezüglich festgestellten Effekte bei hochtrainierten und erfahrenen Flugzeugpiloten sind jedoch alarmierend [38]. Training und die regelmäßige manuelle Ausführung automatisierbarer Fahrtätigkeiten scheinen somit ein wichtiges Instrument zu sein, um die benötigten und erwünschten Kompetenzen der Fahrer aufrechtzuhalten.

Solange der Mensch im Verfügbarkeitskonzept des automatisierten Fahrzeugs vorkommt – ob als Überwacher des Systems oder zur Übernahme der Fahraufgabe –, benötigen sowohl der Mensch als auch die Maschine eine geeignete Repräsentation des jeweils anderen Akteurs. Transparente und an das mentale System des Menschen angepasste Schnittstellen

sind die Voraussetzung für das notwendige Situations- und Systembewusstsein im Umgang mit dem automatisierten Fahren. Andererseits muss auch das technische System in der Lage sein, den mentalen Zustand des Fahrers, seine Intentionen sowie sein Verhalten richtig zu interpretieren und in einem Fahrermodell dynamisch abzubilden. In adaptiven und kooperativen Gestaltungskonzepten werden diese Aspekte bereits in hochautomatisierten Fahrzeugen prototypisch umgesetzt [44, 67]. Darüber hinaus arbeiten aktuell Automobilhersteller und Forschungseinrichtungen in diversen Projekten an den potenziellen Lösungen dieser Probleme (www.adaptive-ip.eu; www.incarin.de; www.urban-online.org).

In den Umfrageergebnissen werden teilweise vorhandene Widersprüche zwischen dem technisch Möglichen und den von der Bevölkerung gewünschten Innovationen sichtbar. Auch wenn man sich mehrheitlich an die Übernahme bestimmter Fahraufgaben (z. B. Geschwindigkeitsregelung) durch Assistenzsysteme gewöhnt hat, wollen die meisten buchstäblich nur ungern das Lenkrad aus der Hand geben. Die heutigen kognitiven und affektiven Repräsentationen zu der Rolle des Fahrers sind noch sehr stark mit dem traditionellen Bild des aktiven Chauffeurs verbunden. Die Vorstellung, im Fahrzeug die Rolle des passiven Passagiers einzunehmen, findet nur wenig Akzeptanz. Das traditionelle, manuell gesteuerte Auto ist in der Bevölkerung noch derart stark mit den Idealvorstellungen assoziiert, dass vollständig autonome Fahrzeuge mehrheitlich noch nicht den Mobilitätsbedürfnissen entsprechen. Die noch offene Frage ist, ob eine schrittweise, evolutionäre Automatisierung des Fahrzeugs die notwendigen Veränderungen mentaler Modelle bezüglich der Rollenerwartungen im autonomen Fahrzeug erreichen kann. Eine situationsspezifische Übergabe der Fahraufgaben an das autonome Fahrzeug kann dabei, wie an den hohen Akzeptanzraten des Valet-Parkens ersichtlich wird, eine mögliche zielführende Alternative darstellen.

Die Ergebnisse der Befragung liefern ferner Anhaltspunkte für mögliche Strategien dieser Transformation, die sich an den Bedürfnissen und Emotionen potenzieller Nutzer orientieren. Das Hauptargument bisheriger öffentlicher Debatten für die Einführung autonomer Fahrzeuge ist die erhöhte Sicherheit im Straßenverkehr. Diese Wahrnehmung wird jedoch nicht von der breiten Bevölkerung geteilt. Vielmehr sehen die Teilnehmer dieser Studie ihre Bedürfnisse wie Stressreduktion, Komfort und Umweltfreundlichkeit im Falle einer Nutzung autonomer Fahrzeuge erfüllt. Gleichwohl sind damit verbundene Emotionen wie Machtlosigkeit und Angst wirkungsmächtige, akzeptanzhemmende Faktoren. Der menschliche Denkapparat ist nicht in der Lage, das Risiko seltener Ereignisse objektiv einzuschätzen [58], sodass die Ängste und Bedenken zu irrationalen Entscheidungen führen können. Eine nutzerzentrierte Entwicklung bedeutet aus dieser Sicht, auf bestehende Bedürfnisse sowohl in der Kommunikation als auch in der konkreten Gestaltung der Systeme einzugehen.

Für den potenziellen Nutzer stellt sich letztendlich die Frage des Mehrwertes eines autonomen Fahrzeugs gegenüber dem bislang noch hoch in der Gunst stehenden manuell gesteuerten Vehikel. Worauf soll die Aufmerksamkeit gerichtet werden, wenn man sich schon nicht mehr aus Sicherheitsgründen mit der Fahrzeugsteuerung beschäftigen „darf“? Entgegen den Erwartungen haben die Teilnehmer mehrheitlich nicht das erweiterte Infotainment-Sortiment von Internet bis Fernsehen vor Augen, sondern wollen vielmehr ungestört

den Blick auf die Landschaft genießen. Wie stabil und valide diese Aussagen im tatsächlichen Umgang mit automatisierten Fahrzeugen sind, werden zukünftige Studien zeigen müssen. Vielleicht steht dieses Bedürfnis aber auch in der Tradition deutscher Romantik und bietet einen neuen Impuls für die Gestaltung des automatisierten, „naturnahen“ Raums.

Literatur

1. Wilson, J.R., Rutherford, A.: Mental Models: Theory and Application in Human Factors. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 31, 617–634 (1989)
2. Bainbridge, L.: Ironies of automation. In: Johannsen, G. (ed.) *Analysis, design and evaluation of man-machine systems*. pp. 151–157. Pergamon (1982)
3. Norman, D.: The “problem” with automation: inappropriate feedback and interaction, not “over-automation.” *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 327, 585–593 (1990)
4. Sheridan, T.B.: Supervisory control. In: Salvendy, G. (ed.) *Handbook of human factors*. pp. 1243–1268. Wiley, New York (1987)
5. Boeing Commercial Airline Group: Statistical summary of commercial jet aircraft accidents: Worldwide operations 1959–2005., <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>
6. Dismukes, R.K., Berman, B.A., Loukopoulos, L.D.: *The Limits of Expertise: Rethinking Pilot Error and the Causes of Airline Accidents*. Ashgate Publishing, Ltd. Federal (2007)
7. Bainbridge, L.: Ironies of Automation. *Automatica*. 19, 775–779 (1983)
8. Endsley, M.R., Kiris, E.O.: The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 37, 381–394 (1995)
9. Madhavan, P., Wiegmann, D.A.: Similarities and differences between human – human and human – automation trust: an integrative review. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 8, 277–301 (2007)
10. Onnasch, L., Wickens, C.D., Li, H., Manzey, D.: Human Performance Consequences of Stages and Levels of Automation: An Integrated Meta-Analysis. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 56, 476–488 (2013)
11. Endsley, M.R.: Situation awareness. In: Salvendy, G. (ed.) *Handbook of human factors and ergonomics*. pp. 528–542. Wiley, New York (2006)
12. Endsley, M.R., Bolte, B., Jones, D.G.: *Designing for situation awareness: An approach to human-centered design*. Taylor & Francis, London (2003)
13. Billings, C.E.: *Aviation Automation: The Search for a Human-Centered Approach*. Human Factors in Transportation. Lawrence Erlbaum Associates Publishers (1997)
14. Parasuraman, R., Sheridan, T.B., Wickens, C.D.: A model for types and levels of human interaction with automation. *Syst. Man Cybern. Part A Syst. Humans, IEEE Trans.* 30, 286–297 (2000)
15. Christoffersen, K., Woods, D.D.: How to make automated systems team players. In: Salas, E. (ed.) *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research*. pp. 1–12. Elsevier Science Ltd. (2002)
16. Kaber, D.B., Riley, J.M., Tan, K.-W., Endsley, M.R.: On the Design of Adaptive Automation for Complex Systems. *Int. J. Cogn. Ergon.* 5, 37–57 (2001)
17. Inagaki, T.: Traffic systems as joint cognitive systems: issues to be solved for realizing human-technology coagency. *Cogn. Technol. Work.* 12, 153–162 (2010)
18. Prevot, T., Homola, J.R., Martin, L.H., Mercer, J.S., Cabrall, C.D.: Toward Automated Air Traffic Control – Investigating a Fundamental Paradigm Shift in Human/Systems Interaction. *Int. J. Hum. Comput. Interact.* 28, 77–98 (2012)
19. Challenger, R., Clegg, C.W., Shepherd, C.: Function allocation in complex systems: reframing an old problem. *Ergonomics*. 56, 1051–69 (2013)

20. Grote, G., Weyer, J., Stanton, N.A.: Beyond human-centred automation – concepts for human-machine interaction in multi-layered networks. *Ergonomics*. 57, 289–94 (2014)
21. Hancock, P.A.: Automation: how much is too much? *Ergonomics*. 57, 449–54 (2014)
22. Arthur, C.: Google's driverless car: no steering wheel, two seats, 25mph, <http://www.theguardian.com/technology/2014/may/28/google-reveals-driverless-car-prototype>
23. Cummings, P.M.L., Ryan, J.: Shared Authority Concerns in Automated Driving Applications. http://web.mit.edu/aeroastro/labs/halab/papers/cummingsryan_driverless2013_draft.pdf. Letzter Zugriff: 28.08.2014
24. Merat, N., Lee, J.D.: Preface to the Special Section on Human Factors and Automation in Vehicles: Designing Highly Automated Vehicles With the Driver in Mind. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54, 681–686 (2012)
25. Hoogendoorn, R., Arem, B. Van, Hoogendoorn, S.: Automated Driving, Traffic Flow Efficiency And Human Factors: A Literature Review. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. pp. 1–18. Transportation Research Board (2014)
26. Lee, J.D., See, K.A.: Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 46, 50–80 (2004)
27. Moray, N., Inagaki, T.: Attention and complacency. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 1, 354–365 (2000)
28. Ghazizadeh, M., Peng, Y., Lee, J.D., Boyle, L.N.: Augmenting the Technology Acceptance Model with Trust: Commercial Drivers' Attitudes towards Monitoring and Feedback. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 56, 2286–2290 (2012)
29. Kazi, T., Stanton, N., Walker, G., Young, M.: Designer driving: drivers' conceptual models and level of trust in adaptive cruise control. *Int. J. Veh. Des.* 45, 339–360 (2007)
30. Koustanai, A., Cavallo, V., Delhomme, P., Mas, A.: Simulator Training With a Forward Collision Warning System: Effects on Driver-System Interactions and Driver Trust. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54, 709–721 (2012)
31. Stanton, N.A., Young, M.S.: Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics*. 48, 1294–313 (2005)
32. Rajaonah, B., Tricot, N., Anceaux, F., Millot, P.: The role of intervening variables in driver-ACC cooperation. *Int. J. Hum. Comput. Stud.* 66, 185–197 (2008)
33. Flemisch, F., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A., Schindler, J.: Automation spectrum, inner/outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. In: Waard, D. de, Flemisch, F., Lorenz, B., Oberheid, H., and Brookhuis, and K. (eds.) *Human Factors for Assistance and Automation*. pp. 1–16. Shaker, Maastricht (2008).
34. Beggiano, M., Krems, J.F.: The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 18, 47–57 (2013)
35. Verberne, F.M.F., Ham, J., Midden, C.J.H.: Trust in Smart Systems: Sharing Driving Goals and Giving Information to Increase Trustworthiness and Acceptability of Smart Systems in Cars. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54, 799–810 (2012)
36. Waytz, A., Heafner, J., Epley, N.: The Mind in the Machine: Anthropomorphism Increases Trust in an Autonomous Vehicle. *J. Exp. Soc. Psychol.* 52, 113–117 (2014)
37. Lee, J.D., Moray, N.: Trust, self-confidence, and operators' adaption to automation. *Int. J. Human-Computer Stud.* 40, 152–184 (1994)
38. Federal Aviation Administration: Safety Alert for Operators 13002. F. S. Service. Departement of Transportation, Washington DC (2013)
39. Buld, S., Krüger, H.-P., Hoffmann, S., Kaussner, A., Tietze, H., Totzke, I.: Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit. Veröffentlichter Abschlussbericht Projekt EMPHASIS: Effort- Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen. Würzburg: Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg (IZVW), Würzburg: (2002)

40. Ward, N.J.: Task automation and skill development in a simplified driving task. In Proceedings of the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association and 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. pp. 302–305, San Diego, CA (Santa Monica, CA: HFES) (2000)
41. Ma, R., Kaber, D.B.: Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *Int. J. Ind. Ergon.* 35, 939–953 (2005)
42. Merat, N., Jamson, A.H., Lai, F.C.H., Carsten, O.: Highly Automated Driving, Secondary Task Performance, and Driver State. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54, 762–771 (2012).
43. Gasser, T.M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W.: BAST-Bericht F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Bremerhaven. (2012)
44. Flemisch, F.O., Bengler, K., Bubh, H., Winner, H., Bruder, R.: Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire., <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24559139>, (2014)
45. Craik, K.J.W.: The nature of explanation. Cambridge University Press, Cambridge, England (1943)
46. Johnson-Lairds, P.N.: Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Influence and Consciousness. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1983)
47. Jones, N.A., Ross, H., Lynam, T., Perez, P., Leitch, A.: Mental Models: An Interdisciplinary Synthesis of Theory and Methods. *Ecol. Soc.* 16, 46 (2011)
48. Moray, N.: Models of models of – mental models. In: Moray, N. (ed.) *Ergonomics: major writings*. pp. 506–552. Taylor and Francis, London, UK. (2004)
49. Nersessian, N.J.: The cognitive basis of model-based reasoning in science. In: Carruthers, S.S. and Siegal, M. (eds.) *The cognitive basis of science*. pp. 133–153. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2002)
50. Norman, D.A.: Some observations on mental models. In: Baecker, R.M. and Buxton, W.A.S. (eds.) *Human-computer Interaction*. pp. 241–244. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA (1987)
51. Zhang, W., Xu, P.: Do I have to learn something new? Mental models and the acceptance of replacement technologies. *Behav. Inf. Technol.* 30, 201–211 (2011)
52. d’Apollonia, S.T., Charles, E.S., Boyd, G.M.: Acquisition of Complex Systemic Thinking: Mental Models of Evolution. *Educ. Res. Eval.* 10, 499–521 (2004)
53. Gefen, D., Karahanna, E., Straub, D.W.: Inexperience and experience with online stores: The importance of tam and trust. *IEEE Trans. Eng. Manag.* 50, 307–321 (2003)
54. Stanton, N., Young, M.S.: A proposed psychological model of driving automation. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 1, 315–331 (2000)
55. Boer, E.R., Hoedemaeker, M.: Modeling driver behavior with different degrees of automation: A Hierarchical Decision Framework of Interacting Mental Models. In: Al., A.G.G. et (ed.) 17th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control. pp. 63–72. Elsevier, Amsterdam (1989)
56. Schröder, T., Huck, J., de Haan, G.: Transfer sozialer Innovationen: Eine zukunftsorientierte Fallstudie zur nachhaltigen Siedlungsentwicklung. VS Verlag fuer Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2011)
57. Gigerenzer, G., Goldstein, D.G.: Reasoning the fast and frugal way: models of bounded rationality. *Psychol. Rev.* 103, 650–69 (1996)
58. Kahnemann, D.: *Thinking, fast and slow*. Penguin, New York (2011)
59. Loewenstein, G.F., Lerner, J.S.: The role of affect in decision making. In: Davidson, R., Scherer, K., and Goldsmith, H. (eds.) *Handbook of affective science*. pp. 619–642. Oxford University Press, New York (2003)
60. Kunda, Z.: The case for motivated reasoning. *Psychol. Bull.* 108, 480–498 (1990)

61. MacKinnon, N.J., Heise, D.R.: *Self, Identity, and Social Institutions*. NY: Palgrave Macmillan, New York (2010)
62. Wolf, I., Schröder, T., Neumann, J., de Haan, G.: Changing minds about electric cars: An empirically grounded agent-based modeling approach. Vorabdruck: <http://arxiv.org/abs/1405.6230>, (2014)
63. Continental AG: *Continental-Mobilitätsstudie 2013*. (2013)
64. Infas, DLR: *Mobilität in Deutschland (MiD) 2008*. Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Bonn, Berlin (2008)
65. Osgood, C.E., Suci, G.J., Tannenbaum, P.H.: *The Measurement of Meaning*. Linguistic Society of America, Urbana (1957)
66. Heise, D.R.: *Expressive order: Confirming sentiments in social action*. Springer, New York (2007)
67. Löper, C., Kelsch, J., Flemisch, F.: Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren. In: Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig (ed.) *Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. pp. 215–237, Braunschweig (2008)
68. Buld, S., Tietze, H., Krüger, H.: Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In: Maurer, M.; Stiller, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. S. 161–187, Springer, Berlin (2005)

Berthold Färber

Inhaltsverzeichnis

7.1 Einleitung 128

7.2 Fragen 129

7.3 Wie kommunizieren Verkehrsteilnehmer? 129

 7.3.1 Schematismenbildung 130

 7.3.2 Vorwegnehmendes Handeln 130

 7.3.3 Nonverbale Kommunikation 130

 7.3.4 Gesichtsausdruck und Augenkontakt 131

 7.3.5 Gesten und Körperbewegungen 131

7.4 Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeiten auf die Verkehrssicherheit 133

 7.4.1 Sonderfälle: Polizisten und Fahrzeuge mit Sonderrechten erkennen 134

7.5 Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeit auf die Akzeptanz autonomer Fahrzeuge 137

7.6 Mit welchem mentalen Modell werden andere Verkehrsteilnehmer auf Fahrfehler von autonomen Fahrzeugen reagieren? 138

7.7 Kulturelle Unterschiede 139

7.8 Kompensationsmöglichkeiten 142

7.9 Neue Kommunikationsformen für einen effektiven Informationsaustausch aus psychologischer und technischer Sicht 143

7.10 Fazit 145

 Literatur 146

B. Färber (✉)
Universität der Bundeswehr München, Deutschland
berthold.farber@unibw.de

7.1 Einleitung

Häufig wird im Zusammenhang mit autonomen Landfahrzeugen der Luftverkehr als Beispiel herangezogen, bei dem – abgesehen von Start und Landung – der Autopilot die Steuerung übernimmt. Somit stellt sich die Frage: Was können wir aus dem Luftverkehr lernen? Die Gemeinsamkeit zwischen autonom fliegenden und autonom fahrenden Fahrzeugen besteht darin, dass der Pilot bzw. Fahrer die letzte Verantwortung trägt. Es gibt aber mehrere Unterschiede zwischen Straßenverkehr und Luftverkehr (und damit ist nicht die Art der Fortbewegung gemeint), die eine Übertragung zwischen den Systemen nicht sinnvoll macht. Ein wesentlicher Unterschied, der im vorliegenden Beitrag von zentraler Bedeutung ist, ist die Anwendung von Regeln sowie die Art der Steuerung. In Bereichen, in denen Flugzeuge aufeinandertreffen – also vor allem beim Rollverkehr – ist alles durch strikte Regeln festgelegt. Weiterhin gibt es eine übergeordnete Überwachung und Steuerung, die dem Piloten exakte Anweisungen gibt und in Zweifelsfällen, die möglicherweise nicht durch Regeln gedeckt sind, Entscheidungen trifft und an den Piloten kommuniziert. Der Pilot hat also in diesen Situationen keinerlei Ermessens- oder Entscheidungsspielraum. Er ist ausschließlich ein ausführendes Organ. Im Vergleich zum Luftverkehr stellt der Straßenverkehr eher ein selbstorganisiertes, chaotisches System dar, das zwar prinzipiell durch Regeln geordnet wird, bei dem aber viele Situationen nicht in einer eindeutigen Regel festgelegt werden können. In diesem Fall kommt dann immer § 1 der Straßenverkehrsordnung (StVO) zur Anwendung, der besagt: „Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert ständige Vorsicht und gegenseitige Rücksicht“, und „Wer am Verkehr teilnimmt, hat sich so zu verhalten, dass kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird.“ Im Sinne eines erschöpfenden Regelwerks für das Verhalten in allen denkbaren Situationen gibt es also im Straßenverkehr eine große Kategorie „Sonstige“, die von Verkehrsteilnehmern im Einvernehmen und unter Berücksichtigung von § 1 StVO gelöst werden müssen. Somit gehört zu den zentralen Aufgaben eines Fahrers zur sicheren Teilnahme am Straßenverkehr auch die Einschätzung des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer. Diese Einschätzung und Vorhersage des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer beruht zunächst auf der Annahme von mehr oder weniger regelkonformem Verhalten der anderen. Zu der Absichtsabschätzung gehört aber auch die Kommunikation der Fahrer und Verkehrsteilnehmer untereinander durch Aktionen und Zeichen. Mit anderen Worten: Neben den „offiziellen“ Regeln existiert ein Satz von informellen Regeln, die den Verkehr steuern.

Wer als Tourist in anderen Ländern unterwegs ist, sei es als Autofahrer oder Fußgänger, kann aus eigener Anschauung erleben, wie sehr informelle Regeln, kulturspezifische Verhaltensweisen und die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern den Verkehr bestimmen. Trifft man als menschlicher Fahrer auf diesen anders gearteten „Regelkanon“, so erlebt man zunächst eine Phase der Irritation. In der zweiten Phase der Adaptation passt man sich im Laufe der Zeit mehr unbewusst an diese neuen, nirgendwo exakt fixierten Regeln an. In der Phase der Konsolidierung erscheinen sie als selbstverständlich, obwohl sie nicht fixiert und teilweise nicht einmal exakt zu beschreiben sind.

Der motorisierte Straßenverkehr stellt ein System mit sehr unterschiedlichen Akteuren dar, das zum Ziel hat, die Teilnehmer sicher, störungsfrei und schnell zum Ziel zu bringen. Unter Systemgesichtspunkten ist unmittelbar einleuchtend, dass die Beachtung informeller Regeln, die Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern und Verhaltensvorhersage anderer zwei wichtige Funktionen erfüllt: Sie unterstützen zum einen den Verkehrsfluss und dienen zum anderen zur Kompensation von Fehlern.

7.2 Fragen

In technischen Termini ausgedrückt sind Menschen multisensorische lernfähige Systeme. Das bedeutet, sie sind in der Lage, verschiedene, auch schwache und nicht eindeutige Signale zu einem Gesamtbild zu vereinen und zu interpretieren. Sie sind weiterhin in der Lage, sich verändernden Gegebenheiten anzupassen und so die beiden o. g. Funktionen – Kompensation der Fehler anderer und Verbesserung des Verkehrsflusses – zu unterstützen. Was aber passiert, wenn nicht nur Menschen, sondern zusätzlich Roboter-Fahrzeuge am Verkehr teilnehmen, die sich streng an Regeln halten und die informellen Regeln sowie Teile der Kommunikation nicht verstehen? Wie reagieren menschliche Fahrer auf diese neuen Verkehrsteilnehmer, speziell in der Übergangsphase, in der die Fahrroboter noch die Minderheit stellen? Sind Menschen in der Lage, schwierige oder scheinbar unauflösbare Situationen kooperativ mit Fahrrobotern zu lösen? Schließlich, über welche Eigenschaften oder Kennzeichnungen müssten Fahrroboter minimal verfügen, um am gemischten Verkehr mit menschlichen Fahrern problemlos teilnehmen zu können?

Diesen Fragen will sich der Beitrag von verschiedenen Seiten nähern. Da autonome Fahrzeuge bislang hauptsächlich unter dem Aspekt technischer Performanz untersucht wurden wie bei der Urban challenge [1] oder der Berta-Benz-Fahrt [2] bzw. im Mischverkehr stets ein Sicherheitsfahrer an Bord war, um im Zweifelsfall einzugreifen (z. B. beim Stadtpilot [3]), existiert zu den oben angeführten Fragen kaum originäre Literatur. Vieles wird daher aus den Erkenntnissen anderer Wissenschaftsbereiche abzuleiten sein.

7.3 Wie kommunizieren Verkehrsteilnehmer?

Neben den vorgeschriebenen Zeichen zum Anzeigen einer Absicht wie Blinker, Warnblinkanlage, Bremslicht, Hupe und Lichthupe kommunizieren Verkehrsteilnehmer über eine Reihe „informeller“ Kommunikationskanäle. Diese Kommunikation im Straßenverkehr ist – im Vergleich zur normalen menschlichen Kommunikation – durch eine eingeschränkte Verständigungsmöglichkeit geprägt. Nach Merten [4] gibt es verschiedene Möglichkeiten der Kommunikation.

7.3.1 Schematismenbildung

Bei der Schematismenbildung wird aufgrund von bestimmten Eigenschaften eines Verkehrsteilnehmers auf dessen Verhalten geschlossen. Beispielsweise wird sich eine ältere Person mit Mobilitätsproblemen anders verhalten als ein Kind. Dem Fahrer eines Sportwagens unterstellt man ein anderes Fahrverhalten als dem Fahrer einer großen Limousine. Diese Schematismen treffen im Fahralltag natürlich nicht immer zu. Sie funktionieren allerdings im Prinzip und helfen, das Gesamtsystem Verkehr zu stabilisieren.

7.3.2 Vorwegnehmendes Handeln

Durch kleine Handlungsschritte ist die Richtung des eigenen Verhaltens für andere Verkehrsteilnehmer frühzeitig erkennbar. Beispiele: Nähert sich ein Fahrzeug dem linken Fahrstreifen (ohne den Blinker zu setzen), so deutet dies auf einen beabsichtigten Spurwechsel hin. Geht ein Fußgänger zielstrebig auf einen Zebrastreifen zu, so wird der Autofahrer annehmen, dass er die Straße an dieser Stelle überqueren will.

7.3.3 Nonverbale Kommunikation

Bei den informellen Kommunikationskanälen spielt die nonverbale Kommunikation vor allem in sogenannten Verhandlungssituationen eine Rolle. Nonverbale Kommunikation ist als Verständigungsform sicher die älteste Form der Verständigung zwischen Lebewesen. Wissenschaftlich hat sich schon Charles Darwin im Jahr 1874 in seinem Buch *Der Ausdruck der Gemütsbewegungen beim Menschen und den Thieren* [5] mit nonverbaler Kommunikation beschäftigt. Wie subtil nonverbale Signale sind, ist aus einer alten Studie von Pfungst [6] über den „klugen Hans“ bekannt, ein Pferd, das aufgrund unbewusster minimaler Signale seines Besitzers oder des Auditoriums „rechnen“ konnte. Die dafür wichtige Erkenntnis lautet, dass nonverbale Signale auch unbewusst ausgesendet werden und daher einer Analyse nicht immer leicht zugänglich sind.

Prinzipiell lassen sich nonverbale Signale in drei Bereiche einteilen:

- Gesichtsausdruck und Augenkontakt,
- Gesten und Körperbewegungen,
- Stimme und Art des Ausdrucks.

Für den Anwendungsfall „Straßenverkehr“ sind nur Gesichtsausdruck/Augenkontakt und Gesten/Körperbewegungen relevant und sollen daher weiter verfolgt werden.

7.3.4 Gesichtsausdruck und Augenkontakt

Im Innerortsverkehr spielt der Blickkontakt zwischen Autofahrern, aber auch zwischen Autofahrern und anderen Verkehrsteilnehmern (Fußgängern, Radfahrern) eine wesentliche Rolle. Ein Fußgänger, der eine Straße ohne Querungshilfe überqueren will, versichert sich mittels Blickkontakt zum Autofahrer, dass er gesehen wird. Wird der Blick vom Autofahrer erwidert, so geht der Fußgänger davon aus, dass er gesehen wird und der Autofahrer Rücksicht nimmt [7].

Beim Einscheren aus einer untergeordneten Straße und dichtem Verkehr auf der bevorrechtigten Straße vergewissert sich der Einscherende ebenfalls mittels Blickkontakt, dass er – trotz sehr geringer Zeitlücke – einscheren darf, da der Fahrer auf der bevorrechtigten Straße seine Geschwindigkeit situationsangepasst reduziert.

Der Blickkontakt ist eine dyadische Kommunikation, d. h., der Blick wird von demjenigen, der angesehen wird, erwidert bzw. nicht erwidert. Wendet der Angesehene seinen Blick ab, so gibt er zu verstehen, dass er den anderen „nicht gesehen“ hat, also auf sein Zeichen und die Verhandlung nicht eingehen will. Bezüglich der Auswirkungen dieser Strategie auf autonome Fahrzeuge ist zu unterscheiden zwischen autonomen Fahrzeugen, bei denen der Fahrersitz besetzt oder unbesetzt ist.

Ist der Sitz des Fahrers besetzt, so gibt es zwei Möglichkeiten:

3. Der „Fahrer“, d. h. die Person auf dem Fahrersitz, ist mit Tätigkeiten im Innenraum befasst und folglich kommt kein Blickkontakt zustande. In diesem Fall kann der andere Verkehrsteilnehmer nicht davon ausgehen, dass sein Verhandlungsangebot angenommen wird, und wird sich entsprechend verhalten.
4. Der Fahrer des autonomen Fahrzeugs betrachtet die Umgebung, weshalb sich die Blicke der beiden Verkehrsteilnehmer treffen, wenn auch eher zufällig. Hier kann der Blickkontakt bei dem nicht-autonomen Verkehrsteilnehmer zu einer falschen Einschätzung der Situation und damit zu einem Konflikt führen.

Ist der Fahrersitz nicht besetzt so erhält der andere Verkehrsteilnehmer keine Information, d. h., die Situation ist wie bei dem Szenario „kein Blickkontakt“.

7.3.5 Gesten und Körperbewegungen

Gesten sind eine weit verbreitete und effektive Art der Verständigung zwischen Verkehrsteilnehmern. Viele Zeichen, die durch Gesten dargestellt werden, sind auch allgemein verständlich und weitgehend eindeutig. So drückt Nicken das Einverständnis mit dem Ansinnen oder der Bitte des anderen aus. Bewegt ein Fußgänger die Arme seitwärts auf und ab, so fordert er Fahrzeuge zum Anhalten auf, beispielsweise um eine Unfallstelle abzusichern. Die Handbewegung von oben nach unten (s. Abb. 7.1) wird eingesetzt, um anderen zu sagen, dass sie langsamer fahren sollen. Eine wischende Handbewegung (s. Abb. 7.2)

Abb. 7.1 Slow-down
(Quelle: [8])



Abb. 7.2 Wischende Hand-
bewegung (Quelle: [8])

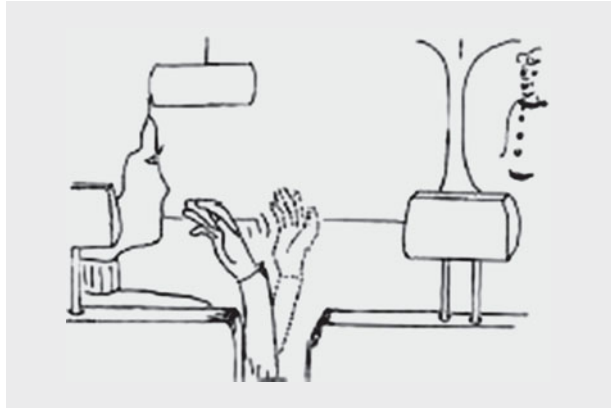


Abb. 7.3 Anbietende Geste



oder die anbietende Geste mit nach oben zeigender Handfläche als Geste (s. Abb. 7.3) bedeutet: Bitte fahre oder gehe Du zuerst – ich verzichte auf mein Vorrecht.

7.4 Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeiten auf die Verkehrssicherheit

Auf den ersten Blick scheint es, als wären die informellen Zeichen wie Blickkontakt, Gesten oder vorwegnehmendes Handeln weniger eindeutig als die vorgeschriebenen Zeichen wie Blinker, Hupe, Lichthupe etc. Dies ist aber keineswegs der Fall. Es ist interessant, dass der Philosoph Heidegger, der sich in seiner Monografie *Sein und Zeit* [9] mit der Eigenschaft von Zeichen auseinandersetzt, das Auto als Beispiel wählt: „An den Kraftwagen ist neuerdings ein roter, drehbarer Pfeil angebracht, dessen Stellung jeweils, zum Beispiel an einer Wegkreuzung, zeigt, welchen Weg der Wagen nehmen wird“ (zitiert nach Frerichs, [10], S. 138). Vielleicht war damals dieses Zeichen noch ein-eindeutig und unabhängig von der Situation, jedoch wird schnell deutlich, dass Signale in unterschiedlichen Kontexten unterschiedliche Bedeutung besitzen. Alle Zeichen, d. h. verbale und nonverbale, sind nur in der Verknüpfung und im Kontext verständlich. Wie Savigny [11] ausführt, muss zwischen Signal und Äußerungsbedeutung unterschieden werden. Eine Lichthupe hat je nach Situation eine unterschiedliche Äußerungsbedeutung. Die Betätigung der Lichthupe durch einen Fahrer, der Vorfahrt hat und verzögert, wird als Angebot zum Einscheren verstanden, beschleunigt er oder fährt mit gleicher Geschwindigkeit weiter, so drückt das gleiche Signal aus, dass er auf seiner Vorfahrt beharrt. Auch der rechts gesetzte Blinker kann bedeuten: „Ich biege ab.“ oder „Ich fahre langsamer, weil ich eine Parklücke suche, und du kannst oder sollst überholen.“

Mit Blick auf die schwächeren Verkehrsteilnehmer ist noch das Beispiel „Fahrradfahrer“ interessant. Radfahrer verwenden noch die Zeichen aus den Anfängen der Motorisierung zur Anzeige einer beabsichtigten Richtungsänderung. Das bedeutet für die Mustererkennung, dass – abgesehen vom Verkehr auf Autobahnen – nicht nur der Fahrradfahrer an sich, sondern auch seine Handzeichen sicher erkannt werden müssen.

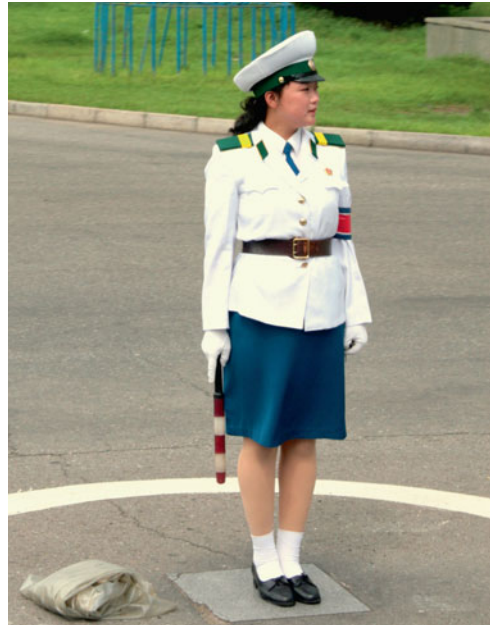
Was bedeutet das für die Verkehrssicherheit? Zunächst ist davon auszugehen, dass autonome Fahrzeuge die mehrfache und kontextabhängige Bedeutung der Signale nicht kennen und sich daher sehr konservativ verhalten müssen. So lange eine sichere Blickerfassung oder das Handzeichen eines Fußgängers nicht sicher erfassbar sind und unter Berücksichtigung der Situation interpretiert werden können, so lange müssen Fußgänger, die sich auf einem potenziellen Kollisionskurs befinden, als Gefahr interpretiert werden und eine entsprechende Reaktion des autonomen Fahrzeugs auslösen.

7.4.1 Sonderfälle: Polizisten und Fahrzeuge mit Sonderrechten erkennen



Abb. 7.4 Verkehrsposten: Verkehr fließt

Abb. 7.5 Verkehrsposten (Nord-Korea):
Brust dem Fahrer zugewandt bedeutet „Stop“



Erkennen autonome Fahrzeuge Fußgänger auf der Fahrbahn, so werden sie anhalten. Was passiert aber, wenn der Fußgänger ein Polizist ist, der den Verkehr regelt? Zum einen muss der Polizist als stehendes Hindernis erkannt werden, dem der Fahrboter ausweichen muss. Darüber hinaus gilt es aber, die Zeichen des Polizisten richtig zu interpretieren. Verhält sich dieser streng regelkonform, wie in den Abb. 7.4 und Abb. 7.5 gezeigt, so kann ein autonomes Fahrzeug die entsprechende Bedeutung lernen. Aus Erfahrung ist aber bekannt, dass Polizisten, die den Verkehr regeln oder Einweiser auf Parkplätzen auch sehr dynamische Gesten verwenden, um den Verkehr zu beschleunigen, also mit den Armen oder Händen winken oder mit den Armen rudern (s. Abb. 7.6, Abb. 7.7 und Abb. 7.8). Menschen verstehen diese Zeichen vor allem aus dem Kontext heraus. Autonome Fahrzeuge müssten – neben der Fähigkeit zur Mustererkennung für Gesten und Körperhaltungen, auch über ein Kontextwissen verfügen, das ihnen die richtige Erkennung und Bewertung der Gesten ermöglicht.

Einen Spezialfall stellt die Berücksichtigung von Fahrzeugen mit Sonderrechten, also Einsatzfahrzeugen von Polizei, Feuerwehr oder Rettungsfahrzeugen dar. Diese Fahrzeuge machen zunächst mit akustischen Signalen auf sich aufmerksam. Optische und akustische Warnsysteme (in Deutschland Martinshorn und Blaulicht) verpflichten den übrigen Verkehr zum Anhalten, zur Gewährung der Vorfahrt an Kreuzungen oder zum Öffnen einer Rettungsgasse. Im täglichen Straßenverkehr werden Fahrzeuge noch nicht anhalten, wenn von Ferne das akustische Signal zu hören ist. Ein derartiges Verhalten würde den Verkehr zu sehr beeinträchtigen, z. B. in der Nähe eines Krankenhauses. Zudem ist eine exakte Lokalisierung der Richtung, aus der das akustische Signal kommt, bei größerer Entfernung nicht möglich. Auch die Erkennung des Sonderfahrzeugs in größerer Entfernung und die fahrspurbezogene Zuordnung dürften sich ebenfalls schwierig gestalten. Deshalb müssten autonome Fahrzeuge aus Sicherheitsgründen bei jedem dieser Signale anhalten, um den Verkehr nicht zu gefährden. Wie sich das auf die Akzeptanz auswirkt, wird in der Folge näher analysiert.

Abb. 7.6 Ein Polizist in Minneapolis gibt Zeichen, dass der Verkehr auf einer Straßenseite losfahren kann



Abb. 7.7 Ein Polizist in Bangkok winkt dem Fahrzeug zum Abbiegen



Abb. 7.8 Ein Polizist in Schweden fordert das Fahrzeug zum Nachrücken auf



7.5 Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeit auf die Akzeptanz autonomer Fahrzeuge

Unter dem Gesichtspunkt der Akzeptanz muss man sich nochmal den Effekt der informellen Kommunikation in „Verhandlungssituationen“ vergegenwärtigen. Diese dient unter Berücksichtigung von § 1 der STVO zur Auflösung von Situationen, die zwar prinzipiell geregelt sind, bei denen die Befolgung der Regel aber zu einer erheblichen Störung des Verkehrs führen würde.

Beispiel 1

Wegen eines parkenden oder liegen gebliebenen Fahrzeugs in der eigenen Fahrspur ist es erforderlich, auf die Gegenfahrbahn zu fahren und dabei im Extremfall eine durchgezogene Linie zu überfahren. Bei dichtem Gegenverkehr erfordert das eine Abstimmung mit dem Gegenverkehr. Abgesehen von dem (verbotenen) Überfahren der durchgezogenen Linie kann die Situation ohne „Verhandlung“ gelöst werden, wenn der Gegenverkehr so stark abnimmt, dass die Benutzung des anderen Fahrstreifens auch ohne Verständigung zwischen den Fahrzeugen möglich ist. Mit zunehmender Verkehrsdichte wird eine Verhandlung mehr und mehr erforderlich.

Wie signalisiert der Gegenverkehr seine Kooperationsbereitschaft? Er muss zum einen verzögern, um eine prinzipielle Möglichkeit zum Ausscheren auf die Gegenfahrbahn zu eröffnen. Verzögern allein reicht meist als Signal nicht aus, denn es kann viele Gründe geben, warum ein Fahrzeug eine etwas größere Lücke zum Vorausfahrenden herstellt. Deshalb zeigt der Gegenverkehr in der Regel seine Absicht durch Verzögern und zusätzlich durch die Betätigung der Lichthupe an. Erkennt nun das autonome Fahrzeug dieses Signal nicht, so wird es als „Verkehrshindernis“ betrachtet, was für die Akzeptanz sicher nicht günstig ist.

Beispiel 2

Autonome Fahrzeuge werden sich, wie eben gezeigt, primär vorsichtiger verhalten als menschliche Autofahrer, da sie wenig Wissen über den Kontext und informelle Zeichen besitzen. Sie können aber auch Manöver fahren, die von einem menschlichen Fahrer normalerweise nicht ausgeführt werden. Im Gegensatz zu menschlichen Autofahrern reagieren sie schneller, d. h., die als „Schrecksekunde“ bezeichnete Reaktionszeit des Menschen entfällt weitestgehend. Dies ist einer der Gründe, warum autonome Fahrzeuge weniger Unfälle verursachen würden. Weiterhin ist aus der Unfallforschung bekannt, dass viele Fahrer das Verzögerungspotenzial ihrer Fahrzeuge nicht voll ausschöpfen und auch beim Ausweichen die physikalischen Grenzen entlang des Kamm'schen Kreises im Allgemeinen nicht erreichen. Fahrer-Assistenz-Systeme wie automatische Notbremse oder Ausweichassistent wollen diese Defizite kompensieren. In Notsituationen könnte also ein autonomes Fahrzeug nicht nur schneller, sondern auch an den physikalischen Grenzen der Längs- und Querschleunigung agieren. Wie sich das auf andere Verkehrsteilnehmer auswirkt, ist momentan weitgehend unbekannt. Ein einfacher Lösungsansatz wird in Abschn. 7.6 diskutiert.

7.6 **Mit welchem mentalen Modell werden andere Verkehrsteilnehmer auf Fahrfehler von autonomen Fahrzeugen reagieren?**

Nahe verwandt mit der vorher genannten Interaktion und Verhandlung ist die Kompensation von Fehlern anderer Verkehrsteilnehmer. Neben der Vermeidung von unmittelbaren Kollisionen durch Ausweichtrajektorien gehört die Toleranz der Fahrfehler anderer zum alltäglichen Straßenverkehr. Zunächst muss geklärt werden, was unter „Fahrfehlern“ zu verstehen ist. Fahrfehler können aus Sicht eines menschlichen Fahrers streng regelkonformes, aber situationsangepasst nicht optimales Verhalten darstellen.

So kann beispielsweise ein Fahrzeug mit einem menschlichen Fahrer, das sich auf einer bevorrechtigten Straße befindet, das autonome Fahrzeug aus der untergeordneten Straße zunächst passieren lassen, weil es sonst nicht in die untergeordnete Straße einbiegen könnte. Der menschliche Fahrer würde also auf sein regelkonformes Vorfahrtsrecht verzichten, was vom autonomen Fahrzeug sicher erkannt werden müsste.

Fahrfehler können aber auch Defizite im Verhaltensrepertoire des autonomen Fahrzeugs zur Lösung spezieller Situationen oder das Erreichen von Systemgrenzen sein.

Beispiel

Ein autonomes Fahrzeug geht im Modus „Staupilot“ in einen sicheren Zustand, weil die Systemgrenzen erreicht sind. Das bedeutet: Das Fahrzeug bremst in den Stillstand. Obwohl prinzipiell das Bremsen bis in den Stillstand im Stau häufig vorkommt, werden die übrigen Verkehrsteilnehmer zumindest verwirrt sein, wenn alle anderen Fahrzeuge fahren und nur das autonome stehen bleibt. Erfolgt das Manöver relativ abrupt und (für andere) aus nicht ersichtlichem Grund, so kann daraus eine Gefährdung entstehen. Allerdings sollte man berücksichtigen, dass sich im aktuellen Straßenverkehr Verkehrsteilnehmer auch nicht fehlerlos verhalten und ihre Fehler meist durch andere kompensiert werden. Somit stellt sich die Frage: Welche Eigenschaften weisen Menschen den autonomen Fahrzeugen zu. Werden sie eher als weniger kompetent im Vergleich zu menschlichen Fahrern eingeschätzt, oder gelten sie als perfekt funktionierende Automaten?

Ziel einer Einführungsstrategie muss die Prägung eines positiven und zugleich realistischen Bildes autonomer Fahrzeuge im Bewusstsein aller Verkehrsteilnehmer sein. Dann, und nur dann werden autonome Fahrzeuge einen adäquaten Platz im System Verkehr einnehmen. Die Voraussetzungen hierfür sind prinzipiell gegeben. So ist aus Umfragen zu neuen Technologien wie etwa der Robotik bekannt, dass Europäer eine positive Einstellung gegenüber Robotern aufweisen [12]. Auch Fahrerassistenzsysteme, als Vorstufe zu hochautomatisierten und schließlich autonomen Fahrzeugen, erfreuen sich mittlerweile eines hohen Ansehens als nützliche Helfer und werden zunehmend von den Käufern nachgefragt [13].

Neben der Einstellung gegenüber technischen Systemen ist die Zuweisung von Fähigkeiten und Eigenschaften neuer technischer Systeme vom Wissensstand der Nutzer abhängig. Naive Verhaltensmodelle von technisch nicht versierten Personen weisen technischen

Systemen in der Regel mehr Fähigkeiten zu, als sie wirklich besitzen. Die aktuelle, vor allem marketingorientierte Demonstration von autonomen Fahrzeugen in den Medien vermittelt den Eindruck, dass diese Fahrzeuge alle Situationen beherrschen können. Damit werden die Erwartungen an autonome Fahrzeuge so hoch, dass Fahrfehler zumindest zur Irritation, wenn nicht zu Sicherheitsproblemen führen. Um ein realistisches Verständnis für mögliche Probleme zu erzeugen, ist es daher essenziell, frühzeitig zu vermitteln, wo die Fähigkeiten und die Grenzen autonomer Fahrzeuge liegen.

7.7 Kulturelle Unterschiede

Im Zusammenhang mit kulturellen Unterschieden stellen sich verschiedene Fragen: Gibt es universelle Grundregeln für nonverbales Verhalten, die nur adaptiert werden müssen? Wie lassen sich kulturelle Unterschiede in der Kommunikation und der Erwartungshaltung auf das Kommunikations- und Entscheidungsverhalten eines Fahrroboters übertragen? Wenn ja, wie lassen sich diese adaptieren? Welche Verhaltensweisen gibt es im internationalen Vergleich?

Die bekanntesten kulturvergleichenden sieben Studien zu nonverbalen Äußerungen anhand des Gesichtsausdrucks stammen von Paul Ekman [14]. Er fand kulturübergreifend einheitliche Gesichtsausdrücke für die Basisemotionen Angst, Ekel, Freude, Trauer, Überraschung, Wut und Verachtung.

Die meisten dieser Basisemotionen treten zwar auch im Straßenverkehr auf, die Bedeutung für die Kommunikation mit anderen ist aber nur von eingeschränkter Wichtigkeit. Eine besondere Bedeutung hat der Ja/Nein-Code in Verhandlungssituationen. In Mittel- und Nordeuropa und den USA gilt Kopfnicken als Bejahung und Kopfschütteln als Verneinung. Im Gegensatz dazu wird in Indien, Pakistan, aber auch in Bulgarien das Kopfwackeln von Schulter zu Schulter, das dem „Nein“ in Europa und USA ähnelt, für „Ja“ verwendet. Schließlich gibt es noch eine Art, Ja und Nein nonverbal anzuzeigen, die in Griechenland, der Türkei und Süditalien verbreitet ist. Das „Ja“ wird durch eine Fallbewegung des Kopfes nach vorne ausgedrückt, für ein „Nein“ wird der Kopf in den Nacken geworfen ([15], S. 134). Missverständlich für die Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmern kann auch noch das Heranwinken mit einer Handgeste sein. Die sogenannte „Paddelgeste“ [15] mit nach unten gerichteter Handfläche dient in Japan und im Mittelmeerraum zum Heranwinken. In England und Deutschland wird sie eher in der Bedeutung „Geh weg!“ eingesetzt. Trotz kultureller Unterschiede nonverbaler Zeichen, die mit den Händen ausgeführt werden, sind interessanterweise speziell diejenigen Zeichen, die zur Beschimpfung anderer im Straßenverkehr dienen, international weitgehend einheitlich. Der erhobene Zeigefinger (s. Abb. 7.9), das Tippen an die Stirn (s. Abb. 7.10) oder das Vorbeiwischen an der Stirn (s. Abb. 7.11) zum Ausdruck von Unverständnis für das Verhalten zeigen dem anderen an, was man von ihm hält bzw. nicht hält. Einzig der vertikale Kreis aus Zeigefinger und Daumen mit abgespreizten restlichen Fingern bedeutet in Deutschland (meist) „o.k.“ oder Lob, während es in Italien „Arschloch“ bedeutet (s. Abb. 7.12).

Abb. 7.9 Erhobener Finger



Abb. 7.10 Verärgerung ausdrücken



Abb. 7.11 Vorbeiwischen an der Stirn zum Ausdruck von Unverständnis mit dem Verhalten des anderen



Abb. 7.12 Alles gut!

Im Gegensatz zu den kulturübergreifenden Basisemotionen „Ärgerzeichen“ existieren für die informelle Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern sicherlich kulturelle Unterschiede, die sich im Fahrverhalten ausdrücken und auch einem Wandel unterworfen sind.

Nach allgemeiner Ansicht fahren Südeuropäer dynamischer und zugleich defensiver als Mitteleuropäer. Als informelle Signale zwischen den Fahrzeugen dienen in Südeuropa vor allem die Beschleunigung und die Hupe. Ein Fahrer, der mit einer starken Beschleunigung (eventuell unter Verwendung der Hupe) in eine Lücke einsichert, erwartet, dass die anderen Verkehrsteilnehmer nachgeben. Er erwartet aber auch keine weitere Rückmeldung, sondern geht davon aus, dass seine Absicht erkannt und akzeptiert wird.

In Mittel- und Nordeuropa wird der Fahrer des einsicherenden Fahrzeugs eher eine Rückmeldung erwarten, zumindest in Form von Blickkontakt oder als Nicken oder Handzeichen. Umgekehrt ist – zumindest in Deutschland – das Beharren auf dem Vorfahrtsrecht verbreitet, sodass ein Einsichermanöver ohne das Einholen des „Einverständnisses“ eines anderen Verkehrsteilnehmers selten ist, da ansonsten die Gefahr einer Kollision droht.

Der Verkehr in USA ist durch gleichmäßiges und spurbezogenes Fahren gekennzeichnet. Hier spielen, abgesehen von den offiziellen Zeichen, informelle Zeichen eine geringere Rolle.

In China ist der Verkehr – zumindest bislang – durch eine geringe Regelbefolgung und eine für Ausländer schwer zu durchschauende Kommunikation geprägt. Chinesische Autofahrer sind Meister der Überraschung, ignorieren Verkehrsregeln, Hupen gilt nur als „freundlicher Gruß“ [16].

Von besonderer Bedeutung ist die Kommunikation zwischen Autos und Fußgängern. Die Verständigung erfolgt hier durch Handzeichen, Betreten des Überwegs oder aber auch Warten am Zebrastreifen, bis die Autos anhalten. Welche Auswirkungen hat das auf das Verhalten von autonomen Fahrzeugen? Zum einen werden autonome Fahrzeuge aufgrund der Trajektorie und Beschleunigung des Fußgängers vorhersagen, ob eine Kreuzungs-

absicht besteht oder nicht. Darüber hinaus gibt es andere Verhaltensweisen, die weniger eindeutig sind: Stehen am Überweg ohne Kreuzungsabsicht (z. B. weil man sich unterhalten will) oder zögerliches Verhalten, das keine eindeutige Querungsabsicht erkennen lässt. In all diesen Fällen würde das autonome Fahrzeug aus Sicherheitsgründen anhalten. Die Konsequenzen sind einerseits „unberechtigtes Anhalten“ bzw. die Gefahr, dass beispielsweise Kinder oder Jugendliche einen neuen Sport entwickeln, Fahrzeuge am Zebrastreifen zum Anhalten zu zwingen.

Allerdings sind die gesetzlichen Regelungen und auch die tatsächlichen Verhaltensweisen zwischen Ländern sehr unterschiedlich. Während beispielsweise in Italien bis vor einigen Jahren kein Anhaltegebot für Autos am Zebrastreifen galt, ist es jetzt eingeführt worden. Nach Berichten von China-Reisenden ist es nur empfehlenswert, den Zebrastreifen als Fußgängerpulk zu überqueren, weil man als Einzelner keine Chance hat.

Fußgänger, die sich mit Handzeichen verständigen, gehen davon aus, dass die Handzeichen gesehen werden – sie werden aber in der Regel ohne Beachtung der Verzögerung des Verkehrs die Straße nicht überqueren.

7.8 Kompensationsmöglichkeiten

Die mangelnden Fähigkeiten von Fahrrobotern zur informellen Kommunikation in „Verhandlungssituationen“ ließen sich im ersten Schritt auf einfache Weise lösen.

Durch die eindeutige und sichtbare Kennzeichnung autonomer Fahrzeuge könnte den übrigen Verkehrsteilnehmern die Besonderheit der Fahrzeuge und ihr abweichendes Verhalten verdeutlicht werden. Dies würde anderen Verkehrsteilnehmern zeigen, dass sie nicht das gewohnte Verhalten erwarten können, und in der Folge auch die Akzeptanz in den oben beschriebenen Beispiel-Situationen erhöhen. Auch Fahrschulfahrzeuge sind ja besonders kenntlich gemacht, um andere Verkehrsteilnehmer zu informieren und um Verständnis für ein entweder sehr regelkonformes oder aber unsicheres Verhalten zu bitten.

Für die Kennzeichnung spricht speziell in der Einführungsphase einiges. Wenn – wie in dem Szenario „Valet-Parken“ (s. Kap. 2) vorgesehen – Fahrzeuge ohne Person auf dem Fahrersitz fahren, so kann dies bei den übrigen Verkehrsteilnehmern zu Irritationen führen. „Bewegt sich das Fahrzeug autonom, oder ist es unkontrolliert unterwegs?“ Durch die Kennzeichnung stellt sich diese Frage nicht. Die Kennzeichnung von autonomen Fahrzeugen kann zudem einen Marketingeffekt haben, der eine schnelle Verbreitung zur Folge hat. So gab es beispielsweise bei der Einführung von ABS Aufkleber für die Heckscheibe mit dem Hinweis „Dieses Fahrzeug hat ABS“, um anzuzeigen, dass der Bremsweg kürzer ist. Technisch gesehen ist das zwar nicht korrekt, da ABS vor allem die Lenkfähigkeit beim Bremsen erhält, aber unter Marketinggesichtspunkten war der Aufkleber ein Erfolg.

Es spricht aber auch einiges gegen die spezielle Kennzeichnung von autonomen Fahrzeugen. Da sie sich, u. a. wegen ihrer eingeschränkten Verhandlungsfähigkeit, absolut regelkonform verhalten müssen, können sie auch Ziel von unerwünschten Eingriffen von außen sein.

Ein einfaches Beispiel

Ein Fußgänger würde eine Straße nicht überqueren, wenn sich ein Auto nähert, da er nicht sicher ist, ob er vom Fahrer gesehen wird und ob der Fahrer bremst bzw. anhält. Bei einem autonomen Fahrzeug kann sich der Fußgänger darauf verlassen, dass das Fahrzeug (unter Berücksichtigung der physikalischen Grenzen) in jedem Fall anhalten wird. Das Stoppen autonomer Fahrzeuge könnte also durchaus ein Sport für Jugendliche werden bzw. Erwachsene dazu verleiten, ohne Rücksicht auf den fließenden Verkehr, die Straße zu überqueren. „Der muss ja anhalten – so ist er programmiert“. Beides ist für den Verkehrsfluss nicht günstig und wird die Akzeptanz autonomer Fahrzeuge nicht positiv beeinflussen.

Ob der Negativeffekt eintritt, ist schwer vorherzusagen. Es hängt sicher stark von der Art und Weise der Einführung autonomer Fahrzeuge ab. Gelten sie als positive technische Neuerung, der man gewisse Schwächen verzeiht, so dürfte der Negativeffekt kaum auftreten. Gelten sie hingegen als Statussymbol für Privilegierte, so wird der „Neidfaktor“ überwiegen und Versuche, das System zu stören, werden gehäuft auftreten.

7.9 Neue Kommunikationsformen für einen effektiven Informationsaustausch aus psychologischer und technischer Sicht

Prinzipiell muss ein autonomes Fahrzeug Gesten bzw. Trajektorien anderer Verkehrsteilnehmer erkennen und interpretieren können. Zur Interpretation benötigt es Situationswissen, um die Zeichen richtig zu deuten. Für die Informationsübermittlung zu anderen Fahrzeugen oder Verkehrsteilnehmern dürften für die meisten Situationen die „offiziellen“ Signale wie Blinker, Hupe und Lichthupe ausreichend sein.

Ein interessanter Ansatz zur Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgängern stammt von der Forschungsgruppe um Kent Larsen vom MIT [17]. In einem Prototyp mit Multisensorik, der allerdings nur entfernt einem realen Fahrzeug ähnelt, wurden mehrere Aktoren eingebaut. Schwenkbare und blinkende LEDs, die wie ein Auge aussehen, wenden sich dem Fußgänger zu und signalisieren ihm: „Ich habe dich gesehen.“

Zusätzlich schwenken gerichtete Lautsprecher zum Fußgänger und sagen ihm, dass er die Straße überqueren kann.

Werden Fußgänger entdeckt, so können LEDs in den Rädern, die die Farbe von Grün zu Orange und Rot ändern, den Fußgängern anzeigen, dass sie erkannt wurden, um sie zu warnen (s. Abb. 7.13).

Ein weiteres Signal, das von autonomen Fahrzeugen an andere ausgesendet werden kann, besteht im „deutlichen Fahren“.

Will beispielsweise ein autonomes Fahrzeug mit einem anderen kooperieren (z. B. Öffnen einer Lücke zum Einscheren), so müsste es deutlich verzögern, um die Lücke erkennbar zu machen und dem anderen Fahrer die Sicherheit zu vermitteln, dass ein gefahrloses Einscheren möglich ist.

Kommunikation und informelle Regeln unterliegen einem permanenten Wandel. Auf der verbalen Ebene lässt sich das eindrücklich an dem Wort „geil“ nachvollziehen. Spätes-

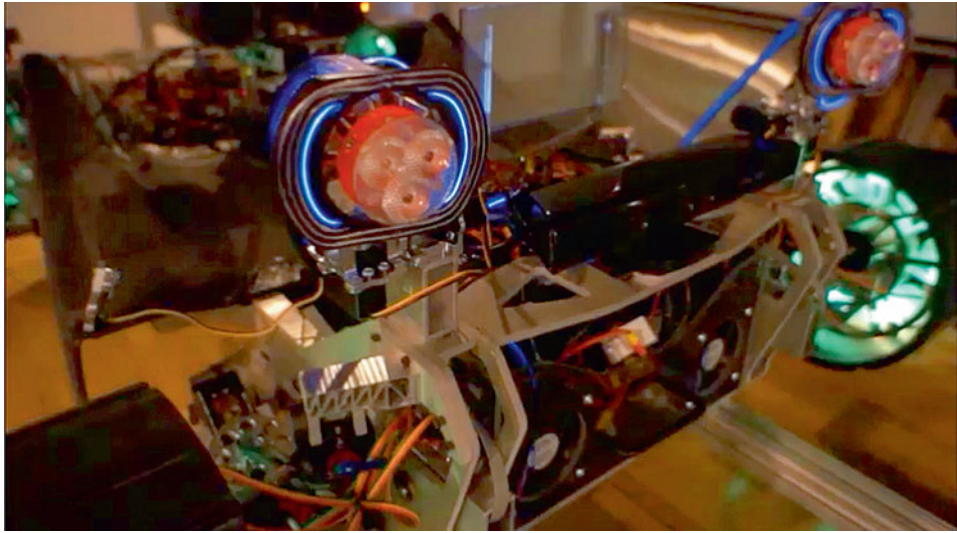


Abb. 7.13 AEVITA: Autonomous Electric Vehicle Interaction Testing Array

tens seit „Geiz ist geil“ hat dieser Begriff aus der Jugendsprache eine völlig andere Bedeutung bekommen. Auch das nonverbale Signal wie der nach oben gestreckte Daumen für „gefällt mir“ ist über die neuen Medien zum aktuellen Standard geworden. Das bedeutet zum einen, dass autonome Fahrzeuge immer wieder neue Zeichen nonverbalen Verhaltens lernen müssten, d. h., ein regelmäßiges Update des Zeichenvorrats und dessen Bedeutung ist erforderlich. Es ist aber auch ein anderer Effekt zu erwarten: Durch die Zunahme autonomer Fahrzeuge mit einem anderen, vor allem an formalen Regeln orientierten Verhalten am Straßenverkehr dürften auch die übrigen Verkehrsteilnehmer dieses Verhalten übernehmen. Damit wird der Verkehr stärker normiert, aber deshalb nicht unbedingt flüssiger ablaufen. Flexible Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern bekommt vor allem bei dichtem Verkehr eine steigende Bedeutung. Die Abstände werden geringer, die Dynamik erhöht sich und die Beachtung von informellen Regeln steigt an.

Eine weitere technische Lösung könnte Car2Car-Kommunikation darstellen. Sie setzt voraus, dass die betreffenden Verkehrsteilnehmer – also nicht nur die autonomen Fahrzeuge – mit der entsprechenden Technik ausgerüstet sind. Car2Car-Kommunikation wird schon lange beforscht, und es existiert eine Reihe von Demonstrationen, auch in größeren Testfeldern, wie etwa simTD [18]. In der Verbreitung von Car2Car (V2V) oder Car-to-X/V2X (Car to Infrastructure/Vehicle to Infrastructure) könnte ein wesentlicher Lösungsansatz für die Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern bestehen.

Frost und Sullivan [19] gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2030 40 Prozent der Fahrzeuge mit V2V- bzw. V2X-Technologie ausgestattet sind, da sich die Nutzer davon große Vorteile wie weniger Staus und eine höhere Sicherheit versprechen. Somit könnte die

zügige Verbreitung dieser Technik, die zunächst etwas anderes im Fokus hat, Kommunikationsprobleme zwischen autonomen und von Menschen gesteuerten Fahrzeugen mildern.

Jedoch werden auch dann noch unauflösbare Situationen für autonome Fahrzeuge entstehen, entweder, weil die anderen Verkehrsteilnehmer nicht über die entsprechende Kommunikationseinrichtung verfügen, oder die Situation durch einfache Kommunikation nicht aufzulösen ist. Führt das autonome Fahrzeug ohne Fahrer, der in diesen Fällen die Fahraufgabe kurzzeitig (aber nicht kurzfristig) übernehmen kann, so muss eine übergeordnete Leitstelle eingreifen.

7.10 Fazit

Sind die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsmöglichkeiten heute noch sehr beschränkt und wenig verlässlich, so wird gerade mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern die Kommunikation mit Blicken, mit Aktionen und Aktionsreihenfolgen vielfältig genutzt. Je nach mentaler Situation wird mehr oder weniger intensiv miteinander verhandelt, z. B. beim Überschreiten des Fußgängerüberwegs. Die dabei angewandten Regeln sind stark kulturell geprägt, insbesondere die Erwartungshaltung an das Gegenüber wird in verschiedenen Kulturen unterschiedlich gesehen, sodass sich keine allgemein gültigen Regeln für den Fahrroboter ableiten lassen. Ein weiteres Problem entsteht allein aus der Nichterkennbarkeit des aktiven Fahrzeugführers, des Roboters. Dies ist zumindest bei fahrerlosen Fahrzeugen offensichtlich. Ist der Fahrerplatz des autonom fahrenden Fahrzeugs aber besetzt, so wird die Kommunikation voraussichtlich falsch adressiert. Ohne Blick- und Gestenerkennung von anderen Verkehrsteilnehmern wird ein Mischverkehr schwierig. Dies gilt vor allem für den Niedergeschwindigkeitsbereich. Mit zunehmenden Geschwindigkeiten nimmt die Bedeutung dieser Kommunikation aus verschiedenen Gründen ab, denn

- sie ist nicht ein-eindeutig,
- sie verlangt vom Partner eine Rückmeldung und dauert daher bei höheren Geschwindigkeiten zu lange,
- die Erfassung durch den anderen Verkehrsteilnehmer ist bei höheren Geschwindigkeiten eingeschränkt, z. B. ist das Blickverhalten in der Kürze der Zeit nicht gut zu erfassen.

Welche Anforderungen ergeben sich daraus für die Absicherung der auf Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern basierenden Funktionalität?

Autonome Fahrzeuge müssen sich somit zunächst so verhalten, als gäbe es keine informelle Kommunikation, also komplett regelkonform. Im Falle einer unauflösbaren Situation muss die Fahraufgabe an einen menschlichen Fahrer übergeben werden. Ist kein menschlicher Fahrer vorhanden, so muss eine Leitzentrale in das autonome Fahrzeug eingreifen. Das Verkehrsmanagement würde analog zum Luftverkehr gestaltet, bei dem eine zentrale Leitstelle alle Flug- und Rollbewegungen steuert. An die Stelle des Piloten,

der Befehle der Leitstelle ausführt, tritt dann der Fahrroboter, der Befehle auf der Manöverebene erhält und diese Aktionen selbstständig auf der Stabilisierungsebene ausführt. Ungeklärt ist dabei noch, wie ein autonomes Fahrzeug erkennen soll, dass die Situation unauflösbar ist und die Leitstelle verständigt werden muss.

Literatur

1. archive.darpa.mil/grandchallenge/ zuletzt besucht am 25.7.2014
2. Ziegler, J., Bender, P., Lategahn, H., Schreiber, M., Strauß, T., Stiller, C. (2014). Kartengestütztes automatisiertes Fahren auf der Berta-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim. FAS 2014, Uni-DAS, S. 97–94
3. Saust, F., Wille, J.M., Lichte, B., Maurer, M. (2011). Autonomous Vehicle Guidance on Braunschweig's inner ring road within the Stadtpilot Project. In: Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden. S. 169–174
4. Merten, K. (1977). Kommunikationsprozesse im Straßenverkehr. In: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg) Symposium 77. Köln: Bundesanstalt für Straßenwesen
5. Darwin, C. (1874). Der Ausdruck der Gemüthsbewegungen beim Menschen und den Thieren. Halle
6. Pfungst, O. (1907). Das Pferd des Herrn von Osten (Der kluge Hans). Leipzig
7. Schmidt, S., Färber, B. (2009). Pedestrians at the kerb – Recognising the action intentions of humans. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 12, S. 300–310
8. Risser, R. (1988). Kommunikation und Kultur des Straßenverkehrs. Wien
9. Heidegger, M. (1927). Sein und Zeit. Tübingen. 11. Auflage 1967
10. Frerichs, K. (1995). Der Winker und das Winken: Ein zeichenphänomenologischer Passus in Martin Heideggers Sein und Zeit. Zeitschrift für Semiotik, Band 17, Heft 1–2. S. 133–142
11. Savigny, E.v. (1995). Autofahrerzeichen: Funktion, Systeme, Autonomie. Zeitschrift für Semiotik, Band 17, Heft 1–2. S. 105–128
12. Special Eurobarometer 382, Public Attitudes Towards Robots, Report Sept. 2012
13. Continental Mobilitätsstudie <http://www.pressebox.de/pressemitteilung/continental-reifen-deutschland-gmbh-hannover/Deutsche-Autofahrer-wollen-Automatisiertes-Fahren-fuer-die-Autobahn/boxid/647170> zuletzt besucht am 26.8.2014
14. Ekman, P. (1975). Universals and Cultural Differences in Facial Expressions of Emotion. In: J. Cole (Hrsg.): Nebraska Symposium on Motivation 1971. Bd. 19, University of Nebraska Press, Lincoln
15. Broszinsky-Schwabe, E. (2011). Interkulturelle Kommunikation: Missverständnisse – Verständigung. VS Verlag, Wiesbaden
16. <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/autofahren-in-china-ein-mann-sieht-rot-5957313.html> zuletzt besucht am 7.8.2014
17. <http://www.technologyreview.com/view/427743/how-do-you-know-an-autonomous-vehicle-has-seen-you/> zuletzt besucht am 8.9.2014
18. simTD deliverable D5.5 (2013) http://www.simtd.de/index.dhtml/object.media/deDE/8154/CS/-/backup_publications/Projektergebnisse/simTD-TP5-Abschlussbericht_Teil_A_Manteldokument_V10.pdf
19. Strategic Analysis of the European Market for V2V and V2I Communication Systems (2014) zitiert nach <http://www.frost.com/prod/servlet/press-release.pag?docid=290129681>

Barbara Lenz, Eva Fraedrich

Wird autonomes Fahren die Mobilität der Menschen verändern? Werden wir in der Zukunft anders mobil sein als heute? Wie wird der Weg in die Zukunft der Mobilität überhaupt aussehen? Und welche Gedanken müssen sich Verkehrs- und Stadtplanung für die mit autonomen Fahrzeugen verwirklichte Mobilität von morgen machen? – Solche Fragen aus dem Teil „Mobilität“ haben zum Ziel, erste fundierte Überlegungen zu einer Alltagswelt zu diskutieren, in der autonomes Fahren einen wesentlichen Bestandteil des Verkehrssystems bildet. Die Autorinnen und Autoren der sieben nachfolgenden Kapitel widmen sich denjenigen Aspekten, die für die Realisierung einer „autonomen Mobilität“ der Zukunft eine besondere Herausforderung darstellen.

Die Gestaltung des Rahmens, in den solche (Mobilitäts-)Entwicklungen gestellt sind, ist eine Aufgabe, der sich die Politik erst ganz allmählich zuwendet. Miranda Schreurs und Sibyl Steuwer zeigen im Kapitel *Autonomous Driving – Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions*, welche Initiativen heute schon seitens politischer Akteure nicht nur in Deutschland, sondern auch in der EU und den USA angeregt wurden. Sie machen deutlich, wie sowohl industrielle als auch politische Ziele und Interessen die Vorgehensweise dieser Akteure leiten und dabei vor allem langfristige Perspektiven verfolgen. Gleichzeitig plädieren die Autorinnen dafür, die Debatte um autonome Fahrzeuge und das autonome Fahren auf eine breite Basis zu stellen, die neben technischen und rechtlichen Fragen auch der gesellschaftlichen Relevanz dieser neuen Technologie Rechnung trägt.

In ihrem Beitrag *Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung* setzen sich Barbara Lenz und Eva Fraedrich mit der Frage auseinander, wie neue Mobilitätskonzepte, z. B. Carsharing, aber auch der öffentliche Verkehr sich verändern könnten, wenn autonome Fahrzeuge in diese Konzepte integriert würden. Sie identifizieren eine möglicherweise sehr weitgehende Flexibilisierung der Systeme, aber auch Ansatzpunkte zur Individualisierung des öffentlichen Verkehrs, und kommen zu dem Schluss, dass autonome Fahrzeuge ein erhebliches, erst allmählich sichtbar werdendes Potenzial für die Umgestaltung des Verkehrssystems und die Steigerung der Attraktivität von öffentlichen

Systemen bieten. Gleichzeitig verweisen sie aber auch darauf, dass solche Entwicklungen an den Kosten und der Rentabilität dieser neuen Systeme zu messen sein werden.

Mögliche Wege zur konkreten Einführung autonomer Fahrzeuge sind Gegenstand des Beitrags *Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge* von Sven Beiker. Der Autor unterscheidet drei Szenarien auf dem Weg zum autonomen Fahrzeug: (1) ein evolutionäres Szenario, (2) ein revolutionäres Szenario und (3) ein transformatives Szenario und prüft sie hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Verkehrssystem, des technischen Entwicklungsbedarfs, der regulatorischen Anforderungen sowie der Bedeutung für Unternehmensstrategien. Er kommt zu dem Schluss, dass die genannten Szenarien derzeit noch völlig unverbunden sind und es nicht unwahrscheinlich ist, dass die Entwicklung zum autonomen Fahren zunächst in unterschiedlichen Anwendungsfeldern vor sich geht, die erst allmählich „zusammenwachsen“.

Was bedeutet es eigentlich für unsere Städte, wenn autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr unterwegs sind? Dirk Heinrichs lotet in seinem Beitrag *Autonomes Fahren und Stadtstruktur* aus, welche Auswirkungen ein automatisierter Straßenverkehr auf die Stadt und ihre (Raum-)Struktur haben könnte. Dazu untersucht er aktuell gängige Szenarien zur Stadt der Zukunft im Hinblick auf die Vorstellungen, die dort für den Verkehr entwickelt werden, insbesondere unter der Annahme eines voll automatisierten Straßenverkehrs. Er zeigt auf, welche positiven, aber auch negativen Wirkungen grundsätzlich denkbar sind. In jedem Fall, so folgert Heinrichs, ist es Aufgabe einer integrierten Stadt- und Verkehrsplanung, sich rechtzeitig mit den Herausforderungen auseinanderzusetzen, die mit dem autonomen Fahren verbunden sind, und dabei vor allem Zusammenhänge zwischen längerfristigen und alltäglichen Mobilitätsentscheidungen in den Blick zu nehmen.

Um künftige Entwicklungen im Bereich Mobilität und Verkehr hinsichtlich ihrer Auswirkungen, aber auch ihrer Steuerbarkeit abschätzen zu können, benötigen Verkehrs- und Stadtplaner quantitative Modelle. Ein wichtiges Element stellen hier sogenannte Nachfragemodelle dar, die z. B. abbilden könnten, wie sich die Veränderung der Autonutzung – nämlich gefahren werden anstatt selbst zu fahren – auf die Mobilität der Menschen auswirkt. Gegenwärtig ist die Entwicklung solcher Modelle aber noch schwierig, da empirische Werte zum Verkehrsverhalten von Menschen angesichts einer Automatisierung des Fahrens nicht vorhanden sind. In ihrem Beitrag *Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung* diskutiert Rita Cyganski die in der Nachfragemodellierung vorhandenen Aufgaben und Möglichkeiten zur Integration von autonomem Fahren. Auf Basis einer Befragung zeigt sie darüber hinaus, dass vereinfachende Annahmen zur Vorteilhaftigkeit des Gefahrenwerdens zumindest aktuell nicht realistisch sind und damit auch keinen geeigneten Ansatzpunkt für die Nachfragemodellierung darstellen.

Ein wesentlicher Einfluss auf die Verkehrsnachfrage geht nicht zuletzt von den Fahrzeugen aus, mit denen die Nachfrage bedient werden kann. Hermann Winner und Walther Wachenfeld beschreiben im Kapitel *Auswirkungen des autonomen Fahrens auf das Fahrzeugkonzept*, welche Möglichkeiten für eine Veränderung des Fahrzeugkonzeptes in den Bereichen Karosserie, Antrieb, Fahrwerk, Innenraum und Mensch-Maschine-Schnittstelle

(MMS) bestehen und wie sich die Fahrzeuge selbst und ihre Nutzbarkeit dadurch verändern könnten. Die Autoren vermuten, dass die Automation kein Treiber einer Revolution der Fahrzeugkonzepte sein wird. Gleichwohl sehen sie erhebliche Möglichkeiten der weiteren zweckspezifischen Ausdifferenzierung der Fahrzeuge, die nicht zuletzt dadurch zustande kommen könnte, dass die Nutzerinnen und Nutzer das Fahrzeug auf neue Art und Weise einsetzen – vielleicht sogar als rollendes Wohn-, Arbeits- oder Schlafzimmer.

Autonome Fahrzeuge werden möglicherweise nicht nur als Individualfahrzeuge genutzt werden, sondern auch Teil von Personentransportsystemen sein. Diese Systeme könnten autonom auf der Straße unterwegs sein und auch automatisiert zur Verfügung gestellt werden. Mit dem Beitrag *Implementierung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems* zeigt Sven Beiker zunächst auf, welche grundsätzlichen Fragestellungen hierbei zu beantworten sind, und stellt dann die derzeit aktuelle Implementierung eines solchen Systems auf dem Gelände der Stanford University in Kalifornien vor. Damit liefert dieses Kapitel ein anschauliches Beispiel für die konkrete Einführung eines Straßenfahrzeugs in einem zwar kontrollierten, aber dennoch öffentlichen Raum.

Miranda A. Schreurs, Sibyl D. Steuwer

Content

8.1 Introduction 152

8.2 Autonomous driving from an innovation policy perspective 152

8.3 Visions of autonomous driving in Europe 154

 8.3.1 European Strategy Documents 155

 8.3.2 Research related to autonomous driving (EU) 158

 8.3.3 Actors and arenas for autonomous driving in the EU 160

8.4 National and international legislative and political developments 161

 8.4.1 Regulatory Changes to the United Nations Convention on Road Traffic
 (Vienna Convention) 161

 8.4.2 USA 162

 8.4.3 Japan 164

 8.4.4 United Kingdom 164

 8.4.5 Sweden 164

 8.4.6 Germany 165

8.5 Analysis 168

8.6 Conclusion 170

References 170

M. Schreurs (✉)
Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik, Deutschland
Miranda.Schreurs@fu-berlin.de

S. D. Steuwer
Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik, Deutschland
sibyl.steuwer@fu-berlin.de

8.1 Introduction

Autonomous driving (self-driving) vehicles, once just a science fiction dream, are a growing reality. Although not commercially available, rapid advancements in technology are creating a situation where technological development needs are moving beyond the regulatory environment. Technological developments have put pressure on governments to make regulatory changes permitting on-road testing of autonomous vehicles. Nevada became the first government worldwide to provide licenses for the testing and operation of autonomous vehicles in the state albeit under strict conditions. The Nevada Department of Motor Vehicles requires that “when autonomous vehicles are eventually made available for public use, motorists will be required to obtain a special driver license endorsement” [8]. Other states have followed Nevada’s lead. New regulations in the United States have provoked the question of whether regulatory changes are necessary in Europe as well. This chapter examines the emerging competition among automobile manufacturers related to the development and deployment of autonomous vehicles and their political and regulatory implications. Special attention is paid to the role of industrial stakeholders and political actors in relation to the development, uptake, and regulation of autonomous vehicle technologies. This is done from a comparative perspective considering developments in the United States, the European Union, the United Kingdom, Germany, Sweden, and Japan. The different framings of autonomous vehicle technologies and their potential contributions are also considered.

8.2 Autonomous driving from an innovation policy perspective

Increasing vehicle automation can be understood as an innovation process that may eventually lead to autonomous or semi-autonomous vehicles. Innovations can be classified according to the kind of innovation (e. g. product, process, organizational), the phases of innovation (invention, innovation, diffusion) or the magnitude of innovation (ranging from incremental to radical). A variety of influencing factors shape innovation processes. These include actors and actor networks, institutional frameworks, and technological developments both inside the innovation system and external to it. There may be co-evolutionary development of (technological) innovations and influencing factors [35]. Political intervention is one factor that can influence innovation processes and is our focus below.

Automated technologies have been incorporated into cars for decades, including anti-lock brakes, rear view alarm systems, lane departure warning systems, and adaptive cruise control. Information and communication technologies are likely to make possible the rapid deployment of some automated technologies (as is already the case with automated braking systems). Automated driving technologies could improve emergency response, enhance public transport systems, and optimize intermodal passenger transport.

Autonomous vehicle technology is now rapidly developing as autonomous driving vehicles are tested on the road. Various future development paths are possible as indicated

by the use cases described in the chapters by Wachenfeld (Ch. 2, see also Beiker in this book Ch. 14). Autonomous vehicle technology development paths range from incremental (e.g. automatic braking systems and transmission systems) to larger (automated crash avoidance safety systems and autonomous valet parking) to revolutionary changes to existing systems (fully autonomous vehicles in regular traffic) (for a definition and nomenclature see e.g. [25]). Depending on the state of a technology and the degree to which it has been implemented, there are different policy implications and regulatory intervention needs.

Different technological and use paths place different demands on the policy system. Incremental technological changes can usually be addressed with relatively minor changes to existing regulatory frameworks. More radical technological changes, such as the fully autonomous vehicle, will require deeper regulatory interventions as well as societal awareness raising and acceptance. The information and communication technologies (ICT) used in autonomous vehicles could also raise various questions related to data protection and storage although this will depend very much on the kind of technologies employed (Ch. 24).

Certainly one of the changes visible in relation to the emergence of autonomous vehicle technology is the emergence of new stakeholders. The technologies involved have widened the field of actors engaged in transport policies and led to the formation of new political coalitions. The ICT industries are important stakeholders in autonomous vehicle technologies and policies. Auto manufacturers and other players (like Google) are both in competition in the development of prototypes and in co-operation with each other in an effort to achieve a more favorable regulatory environment for the testing of autonomous vehicle technology.

The commercialization of autonomous vehicles is envisioned in the coming years by some manufacturers although there is considerable uncertainty as to when and if the technology will be made commercially available any time soon. Conditions for commercialization may also vary significantly country to country depending on road traffic conditions. While there are many questions as to whether commercialization is realistic in the near future, expert communities are urging regulators to prepare. In some jurisdictions (especially in the United States) early preparatory steps for potential deeper regulatory changes are being taken.

The speed and quality of advancements in autonomous driving technologies will impact demands for political intervention and steering. Many political interventions are driven by technological advancements. In the case of incremental technology development, there may be a parallel process of incremental regulatory changes, licensing decisions, or increase or decrease in financial or other political support schemes.

Incremental technological changes can be researched from the perspective of systems innovation theory, where innovations are understood as a result of multilateral interaction processes among firms, industries, organizations, and institutional frameworks [13], [14]. In the case of more revolutionary technological developments, which result in more disruptive changes to the status quo, politicians may be forced to make rapid and major regu-

latory decisions with little preparatory or learning time and with few existing experiences to draw upon.

In some cases, political actors may decide to try to accelerate the development of certain technologies and their large scale application. We have seen examples of policy-driven development with, for example, nuclear and renewable energies. In these cases, governments set incentives to support the development of these technologies, e. g. with research and development funding, support schemes, loans, the provision of infrastructure, and the taking over of liability risks even though in some countries, there were later decisions to phase out the use of a particular technology. There are also various examples in the transport sector, where state actors aimed at paving the way for certain technological choices. Apart from providing road infrastructure and thereby supporting individual automotive transport systems, e-mobility is a recent example of an attempt by policy-makers to help boost the implementation of a particular technology on a larger scale [9].

Policy makers do not typically like to intervene in the workings of market economies but at times may feel pressured to do so. As Edquist formulates it, “[t]here must be a ‘problem’ – which is not automatically solved by market forces and capitalist actors – for public intervention to be considered” [14].

Different factors may be behind a decision to support new technologies or technological applications. Policy makers may choose to promote a technology’s development in order to support the competitiveness of a domestic industry, in response to problem-pressures (e. g. safety or environmental factors), to experiment with new technological possibilities, or in reaction to international developments. As Edler and his colleagues put it: “Public innovation policy aims to strengthen the competitiveness of the economy or of selected sectors, in order to increase social welfare through knowledge creation and economic success” [12]. Numerous studies illustrate the importance of political intervention especially in the field of environmental policy innovation (see e. g. [30], [31], [32]).

There are several ways political actors can support the development and diffusion of new technologies. They may encourage and support the development of expert networks, finance research and development, create demand for a certain technology (e. g. by setting up support schemes or mandating government purchasing of a technology), and, by providing basic infrastructure (for a summary of approaches see [35]). Research support has been relevant in the development of autonomous vehicle technologies as well. States that are lagging behind in the technology are now scrambling to catch up. Since innovations go through various phases (see e. g. [26], [36]), governmental interventions may also be limited to particular innovation stages of a technology.

8.3 Visions of autonomous driving in Europe

Visions of the future can both influence and reflect regulatory debates and their public perception. Visions for autonomous driving are being shaped by various stakeholders who have their own interests in advancing particular framings. When particular framings of a

technology take hold, they have the potential to direct future R&D trajectories and other societal and political actions. As we will see below, autonomous vehicle technologies are increasingly being viewed as an important component of future transport systems. Their development is being linked to concerns about industrial competitiveness, sustainable development, resource efficiency, safety, and assistance for the elderly and others who might otherwise not be able to drive a car. At the same time, there are some voices of concern that there could be a loss of control through robotization of automobiles. Here we consider how autonomous driving is discussed at the European level before turning further below to discussions in other economies.

To understand how autonomous driving vehicles are being discussed at the European level, we looked at strategy documents, European-funded research projects, and important networks related to autonomous driving. The analysis shows something of a mismatch between the interests of specific industrial actors in a rapid commercialization of autonomous driving technologies with broader European visions and objectives in the transport area in which autonomous driving technologies play some role, but little attention is given to autonomous vehicle technologies. Autonomous driving technologies are not widely discussed in European strategic documents although some research projects are being funded. This could be important since the extent of attention given to a subject and the visions associated with it may determine whether or not political support is lent to a technology's development. With little explicit attention given to autonomous driving vehicles at the European level, little political action can be expected unless there are either sudden technological innovation shocks or stronger political lobbying by stakeholders.

8.3.1 European Strategy Documents

Autonomous driving technologies have received little attention to date in European Commission strategic documents, including roadmaps, green papers, and white papers. To the extent autonomous vehicle technologies are discussed it is often in the context of broader EU debates on European competitiveness, innovation, climate protection, energy security, employment, and education (the EU 2020 strategy) [17].

Guided by the general framework objectives of the EU 2020 strategy, the following documents were analyzed: "Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system" [18], "Research and innovation for Europe's future mobility. Developing a European transport-technology strategy" [19], the "CARS 2020: Action Plan for a competitive and sustainable automotive industry in Europe" [20], and the "Directive on Intelligent Transport Systems" [24]. These strategic documents cover issues linked to autonomous driving: mobility, infrastructure, digitalization, and general European discourses related to innovation and climate protection. The documents differ in their degree of specificity.

These documents shed light on which actors are taking up autonomous vehicle developments and give an impression of how far reaching the debate on autonomous driving

currently is in Europe. They also give a picture of how autonomous driving technology is being framed and which other societal, technological, and political issues it is being linked to. Finally – and maybe most importantly – these documents hint at the opportunities for and obstacles to the wider implementation of autonomous vehicle technologies at the European level.

8.3.1.1 Competitiveness and Innovation

The European Union has as one of its goals the strengthening of the competitiveness of European industry and technological leadership including in important sectors like transport. The European Union's transport roadmap stresses that "innovation is essential" to maintaining European competitiveness. Three areas of innovation that are stressed are: "efficiency through new engines, material, and design", "cleaner energy use", and "safer and more secure operations through information and communication systems" [18].

The communication document from the European Commission to the Parliament and the Council with the title "Research and innovation for Europe's future mobility. Developing a European transport-technology strategy" [19] can be seen as the starting point for the development of a strategic transport-technology plan. At its visionary core is the expected change towards high value-added, innovative transport technologies. The transport industry of the future is expected to have to deal with highly complex mobility systems and to achieve this with a much lower carbon content. New materials, new production processes and new technology partners as well as "a stronger cross-fertilisation between the transport modes" are seen as crucial elements of this industry transition. The communication further stresses the expectation that the transport sector, the energy sector and information and communication technologies will be increasingly intertwined.

With regard to the automotive industry, strengthening competitiveness is central to European policy-makers. This is reflected by the CARS 2020 Action Plan, which was developed by DG ENTR (Directorate-general for Enterprise and Industry). The Competitive Automotive Regulatory System for the 21st century (CARS 21), the antecessor to CARS 2020, is concerned with overcoming the economic crisis in general and the crisis of the European automotive industry in particular. It sets a vision of: "An automotive industry that is leading in technology, in coordinated action with the fuel supplier industry, producing vehicles which are attractive to EU consumers, clean in terms of regulated pollutants, more fuel-efficient, safe, quiet and connected" [20].

8.3.1.2 Efficiency and sustainability

At the European level, innovation is often linked to the development of an energy and resource-efficient and sustainable transport system. The transport roadmap spells out "A vision for a competitive and sustainable transport system". The document highlights the dual goal of increasing transport and mobility within the Union while reducing greenhouse gas emissions by 60% until 2050. It further links EU 2020 and its flagship initiative on resource efficiency to transport policy. This translates into a transport system that must use "less and cleaner energy, better exploit a modern infrastructure and reduce its negative

impact on the environment and key natural assets like water, land and ecosystems” [18]. The document preparing the transport-technology strategy repeatedly stresses the EU’s vision to strengthen competitiveness by decarbonizing the transport system and accordingly calls for research in green technologies, material substitutions, and ICT in order to optimize intermodal and public transport and thereby enhance efficiency [19]. The CARS 2020 action plan also establishes a strong link between competitiveness and clean and green vehicles [20].

8.3.1.3 Harmonization and coordination

Realizing a single European market is at the heart of all European strategic documents related to transportation. This is a factor in the strong push for greater harmonization and coordination of national policies. The transport roadmap highlights the importance the EU Commission attaches to harmonization; here it is argued that “a situation where (for example) one Member State opted exclusively for electric cars and another only for biofuels would destroy the concept of free travel across Europe.” It also illustrates that the EU Commission aims at influencing technology development.

Also in the CARS 2020 action plan the fragmentation of vehicle regulation among EU Member States is considered problematic. The European Commission has called for more co-ordination and standardization [20]. In the CARS 21 process, Europe’s role in standardization has been highlighted. European Commission Vice-President Neelie Kroes “underlined the business opportunities created by making vehicles digital and connected, which requires public support for funding and standardization” [4]. CARS 2020 mentions the deployment of Intelligent Transport Systems (ITS) with reference to the automatic emergency call system, eCall as a particular organizational challenge, which demands strong coordination [20].

8.3.1.4 Safety

The “vision zero” which refers to the goal of eliminating traffic fatalities and injuries by 2050 is a key selling point for the industry. Safety is also addressed in the transport roadmap, although it receives considerably less attention compared to other issues, such as competitiveness, sustainability, resource-efficiency, or innovation.

The “vision zero” is mentioned as the ninth of ten goals of the transport roadmap. In line with this goal, the EU aims at halving road casualties by 2020. The EU is to be a world leader in safety and security of transport in all modes of transport [18]. Annex I spells out how to approach that goal and mentions – besides training and education – technological solutions such as “driver assistance systems, (smart) speed limiters, seat-belt reminders, eCall, cooperative systems and vehicle-infrastructure interfaces.” These can be seen as steps towards a general increase in automation and employment of information and communication technologies.

While the Directive on Intelligent Transport Systems puts comparatively high priority on an increase in safety through the application of information and communication technology, it does not explicitly speak of autonomous driving [24].

8.3.1.5 Summary

The document, “Research and innovation for Europe’s future mobility. Developing a European transport-technology strategy” [19] is where one might expect autonomous driving to be discussed as the communication addresses research, innovation, and mobility issues. Yet, while the term ‘smart’ occurs repeatedly in the text, neither ‘autonomous’ nor ‘driverless vehicles’ are mentioned. ‘Intelligent’ and ‘automated’ are mentioned only once in the context of transport infrastructure: “Modern infrastructure will increasingly incorporate new components which make it smart (intelligent, ICT-enabled and automated), green (new light and recyclable materials) and intermodal (automated terminals, hubs, and equipment). It will integrate the provision of alternative, low carbon fuels and innovative management and operation systems” [19].

Also with regard to research and innovation, autonomous driving is not discussed in the transport-technology strategy document although it could be argued that smart mobility is related to autonomous driving. Many of the visions described in the strategic document can be seen as being linked to autonomous vehicles, such as the interdependence between information and communication technologies and the transport system. Yet the main focus is on green technologies, material substitution and ICT and the optimization of intermodal transport.

Similarly, autonomous driving is not explicitly mentioned in the transport roadmap. Rather, intelligent transport systems, new communication services, and improved traffic management and information systems are seen as future opportunities to optimize traffic flow and reduce congestion and it is in this context that there are calls for further research and innovation. Links are made to multimodality and optimization of the use of infrastructure. Increased automation is not discussed centrally in relation to the modernization of the automotive industry in Europe. It is not even mentioned as an explicit topic in the CARS 2020 action plan.

The Directive on Intelligent Transport Systems, supported by DG Transport, targets steps to be taken towards the application of ITS and thus could be argued to touch upon aspects of autonomous driving, but does not explicitly mention the term or similar terms [24].

In summary, it can be said that while developments related to autonomous driving are mentioned in major strategic and vision documents, autonomous vehicles or autonomous driving are as such not firmly embraced by European bureaucrats or politicians.

8.3.2 Research related to autonomous driving (EU)

Somewhat more attention to autonomous vehicle technologies is being paid in European-funded research projects. There are various research projects funded by EU institutions that could impact autonomous driving. eCall is an initiative to bring rapid assistance to motorists involved in accidents. The Galileo project is a civilian global satellite-based navigation system. TAXISAT, is a related global navigation satellite system being developed for taxis. The SARTRE project, which is funded under the European Union’s Framework 7 program,

aims at advancing platooning (convoying to make more efficient use of road space). The project HAVE-it follows a long-term vision of autonomous driving and aims at high levels of automation. The purpose of the project is to “develop, validate and demonstrate important intermediate steps towards highly automated driving” such as advanced driver assistance systems. The research project, “SMART- New services enabled by the connected car”, focused on the implication, benefits, and services of connected cars. The project’s final report concluded that the connected car may make better use of infrastructure and will increase safety as well as fuel efficiency. The EU project “Citymobil – Advanced Transport for the Urban Environment” looked at automated public transport systems and some showcases (e.g. La Rochelle, Heathrow) with the aim of bringing the implementation of these public transport systems in cities one step further. An example of a joint public-private R&D initiative supported by various directorates-general (RTD – Research and Innovation, CNECT – Communications Networks, Content and Technology, ENER – Energy, ENV – Environment, ENTR – Enterprise and Industry) in the vehicle area is the European Green Cars Initiative launched in 2009 and with a priority on the development of efficient, safe, and environmentally friendly mobility, especially electro-mobility. Another important project is AdaptIVe, a successor to InteractIVe. Started in January 2014 and funded by the European Union’s Framework 7 Program, this consortium of 29 partners aims to demonstrate the potentials for automated driving in complex traffic environments while addressing some legal issues related to levels 1 to 4 of the SAE classification system.

Currently, the European Union is supporting research on autonomous driving within its framework research support scheme, “Horizon 2020”. There are several entry points for research on autonomous vehicles under the Horizon 2020 work program on leadership in enabling and industrial technologies in the section on Information and Communication Technologies [22]. Research for the transport sector is funded via the work program’s section 11 on smart, green and integrated transport. Here, autonomous driving is explicitly mentioned: “Automated and progressively autonomous driving applications in road transport, actively interacting with their intelligent environment could provide an answer to the EU objective of reconciling growing mobility needs with more efficient transport operations, lower environmental impacts and increased road safety” [21]. Apart from technical aspects including research on Advanced Driver Assistance Services, other aspects are supported such as behavioral aspects of driving (users’ responses to technology and on-board infrastructure, conditions of attention/loss of attention, etc.), ethical and gender issues as well as liability and standardization questions. The aim is to enhance the technology’s robustness and effectiveness in real-life situations.

In sum, research funded by the EU addresses various aspects of vehicle automation, the linking of information and communication systems to enhance efficiency, and research into autonomous vehicle technologies. There are growing signs of interest in the legal and societal implications of various automation levels and efforts to develop common definitions of vehicle automation levels. In the future, there will be need for more research on legal and societal questions tied to the greater use of automation in the transport sector.

8.3.3 Actors and arenas for autonomous driving in the EU

At the European level, different Directorates General (DG) are involved with questions addressing autonomous driving, with DG Connect being somewhat more engaged than for example, DG Mobility and Transport (MOVE) or DG for Enterprise and Industry (ENTR). In general, the EU Commission's interests in the transport area are more related to strengthening competitiveness throughout the whole Union including in remote areas (by e.g. supporting basic infrastructure development) and combatting climate change (i.e. e-mobility, urban development that supports public transport, bicycles, etc.) and not so much on implementing a vision of widespread use of autonomous driving vehicles.

DG Connect supports research in the field of automated mobility. It mainly addresses the research on intelligent transport systems (ITS) and highlights the role of ICT for ITS and mobility for it helps to reduce greenhouse gas emissions, increases energy efficiency in the transport sector, and enhances safety and mobility for people and goods in general. ICT is, however, mostly connected to the provision of real-time traffic information and not explicitly to autonomous road vehicles.

Information on autonomous driving is generally best assessed from DG Connect. While various aspects and projects are listed on their website, DG Connect forwards the reader to the iMobility Forum when looking for 'Automated Driving'. iMobility is one of the two main platforms on the European level that addresses vehicle automation. Via the iMobility Forum, the Commission is in contact with stakeholders. The platform is chaired by DG Connect and co-chaired by ERTICO-ITS Europe as well as the European Automobile Manufacturers Association (ACEA) and the European Association with tolled motorways, bridges and tunnels (ASECAP). Within iMobility, there is a working group on vehicle road automation. DG Connect partly finances this network. The iMobility Forum is linked to the ERTICO platform on intelligent transport systems in Europe. It was founded as a joint initiative by the European Commission, national transport ministries as well as industry representatives and aims to be a networking platform to spur exchange between actors and stakeholders related to all kinds of aspects of intelligent transport systems. It gives an overview of various research projects and activities in European Member States on ITS – and accordingly, automated vehicles [16].

In addition, the European Union provides a platform for debating visions of the future: FUTURIUM, part of the Digital Agenda of Europe. Several articles about autonomous driving can be found here.

To summarize, autonomous driving is not strategically anchored in European policy-making. The overarching discourses and objectives in the European transport sector can be subsumed under the headlines "competitiveness", "sustainability", "efficiency", "low-carbon" and, to a lesser degree, "safety". While autonomous driving can arguably contribute to any of these overarching objectives, stakeholders have not yet made much effort to make these links. The actors most actively addressing autonomous driving at the EU level deal with communication technologies, smart mobility, and intelligent transport systems (DG Connect including links to the EU's vision for the Digital Europe). The auto-

motive industry is mainly represented by its association. Individual companies do not appear very active on this issue at the EU-level. Autonomous driving is still in the realm of research rather than implementation and there exists no delineable vision for a future where autonomous vehicles play a major role. The cases addressed in this book do not play a role at the European level. In addition, there is a lack of integration of the topic into existing visions on transport and mobility. The needs for regulation and further research and development are being discussed in working groups both at the European and the German national levels, although autonomous driving is not high on the political agenda in either case. While the European Commission's administration is (co-) funding some of these initiatives, it has not taken a lead on the regulatory front; rather it is mostly active in supporting research and development. This is similar to the case in Germany. The issue of autonomous driving is on the radar screen of the German transport ministry and major associations but is only now slowly beginning to gain somewhat more attention. As is discussed further below, one relatively important new development is the reform of the United Nations Convention on Traffic Safety of 1968 that has been pushed by European automakers concerned about losing ground to international competitors. Next on their agenda is likely to be enabling legislation at the national level for testing purposes.

8.4 National and international legislative and political developments

There are some differences in national discourses and support strategies for autonomous vehicles in major automobile producing markets and in the European Union. Below we consider developments in the United States, Japan, the European Union, the United Kingdom, Sweden and Germany. A common characteristic of these countries and the EU is that they lack national regulations for autonomous vehicles. It has been with state-level regulations in the United States and special permits in the case of European countries that test driving of self-driving cars has begun on the public roads [33].

8.4.1 Regulatory Changes to the United Nations Convention on Road Traffic (Vienna Convention)

Reacting to developments in the United States, at the European level debates about the need for modifying the United Nations Convention on Road Traffic (the Vienna Convention) which had been on-going for about a decade, intensified. Article 8, paragraph 5, of the 1968 convention states: "Every driver shall at all times be able to control his vehicle or to guide his animals" [7]. Before Google pushed the debate forward, there was considerable disagreement among experts as to how much of an obstacle the Vienna Convention was. Google's release of its Self-Driving Car tipped the scale in the direction of regulatory change. As reported by Euractiv in the summer of 2013: "The EU is currently slightly

lagging behind the US. Autonomous driving is forging ahead in the US where steps are currently being taken to advance the technology by states adopting laws allowing for public road testing. However, Europe continues to lag behind the US with restrictive legislation that could, for the foreseeable future, effectively prevent the introduction of more advanced autonomous driving systems”. The report notes that “while the technology is ready, appropriate infrastructures and legal framework are still missing” [34]. In May 2014, the governments of Germany, Italy, France, Belgium, and Austria jointly proposed an amendment that was agreed to by the U.N. Working Party on Road Traffic Safety. The amendment would allow self-driving technologies as long as the system “can be overridden or switched off by the driver” [40]. If agreed upon by the parties to the convention, this could ease conditions for research and development of autonomous vehicles in many countries. For a more critical discussion see also section 8.4.6.

8.4.2 USA

The United States is the most advanced nation in terms of introducing autonomous driving vehicles into its transport system. Legislation on autonomous driving has been passed in California, Michigan, Nevada, Florida, and the District of Columbia. In another six states – Arizona, Colorado, New Hampshire, Oklahoma, Oregon, Texas – the legislative attempts failed or are pending. There are another dozen states with ongoing regulatory initiatives. Some common features of their regulation regard the definitions of autonomous driving and autonomous vehicles employed and the conditions for obtaining operation and testing permission. Liability issues are also beginning to gain attention. California has set a 2015 deadline for the establishment of liability rules [51]. The newly enacted legislation in the United States has been developed with an eye towards allowing the testing of autonomous driving vehicles; most existing legislation is very restrictive regarding their use. At this stage neither the US government nor the automotive industries want to take large risks in relation to a technology that is still in an early development stage and that must still prove its reliability and safety. The same could be said for the other countries looked at here.

Regulatory initiatives in the United States were a direct response to Google’s push for legal clarification regarding the status of autonomous vehicles. Google, an active developer of self-driving software and technology, has lobbied state by state for the legislation enabling the operation of self-driving vehicles.

Various US politicians have strongly spoken up for the technology. Governors and other state politicians have on various occasions praised autonomous vehicles in public and claimed their leadership relative to other states by being frontrunners in passing supportive legislation.

Nevada Governor Brian Sandoval in early summer 2011 upon the passage of his state’s first law on autonomous driving vehicles stated: “Nevada is the first state in the country that is going to be (adopting) regulations for this vehicle (...) I think it is important for Nevada to be first on this. This is going to be part of the future and Nevada has always been

a very progressive state” [52]. In the Florida Senate, Republican Jeff Brandes sponsored an autonomous driving bill stating, “this legislation is about vision and leadership for the 21st Century world and forges a path for future innovative economic opportunities for Floridians” [42]. In September, when signing autonomous driving into law, California Governor Jerry Brown pointed out that he sees autonomous vehicles as “another example of how California’s technological leadership is turning today’s science fiction into tomorrow’s reality. (...) This law will allow California’s pioneering engineers to safely test and implement this amazing new technology” [2]. Noting that the state was slipping behind competitors, Michigan’s Governor Rick Snyder urged action. In his State of the State Speech in January 2013 the governor lamented: “They [California, Nevada and Florida] are ahead of us, and aren’t we the automotive capital of the world?” [5]. These examples give a clear impression of how politicians are starting to see autonomous vehicle technology and why they are promoting autonomous driving. For the leaders of these pioneering states, autonomous driving is seen as a sign of being on the technological cutting edge. The technology’s developers stress the safety benefits expected to come with the implementation of the technology, the increased comfort it will provide for elderly people, and the reduction in traffic congestion it should bring about.

Google has been an important entrepreneur that has stimulated both technological and regulatory developments. Google is a new and non-traditional player in transport, a sector which until now has been dominated by the automotive industry. With its retrofitting of automobiles with robotic software, the IT-company has challenged the automotive industry to innovate in new directions (Chapter 10). As noted above it has also put regulators under pressure to take action. Indeed, regulations have had to catch up with the technological innovations. Google’s actions have also pushed self-driving technologies onto the international agenda. It has opened up new research agendas and challenged policy makers and legal experts to consider the technological and social meanings of this rapidly developing new technology. In the European Union as well as internationally, it is also leading to discussions about the need for early harmonization of standards so as to prevent the institutionalization of incompatible standards in different world regions, e. g. via United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) regulations and vehicle type approvals that make sure that a vehicle’s design conforms to technical requirements. Beyond these issues, the role of ICT in the automotive industry of the future and very importantly, data protection concerns, will need societal debates and decisions.

In May 2013, the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) established an official classification scheme for vehicles which range from level 0 where the driver is in complete control of the vehicle at all times to level 4 where the vehicle performs all safety-critical functions and monitors roadway conditions for the entire trip and could include unoccupied cars. The intermediary levels make increasing use of autonomous vehicle technologies. The NHTSA also issued recommendations to aid states as they make regulatory decisions regarding vehicles with new technological capacities [1]. There are other classification schemes that have developed as well. In particular the comprehensive SAE Standard J3016. It distinguishes between six categories with levels 0 (no automation),

1 (driver assistance) and 2 (partial automation) subsumed under the headline “human driver monitors the driving environment” and 3 (conditional automation), 4 (high automation) and 5 (full automation) labeled as “automated driving systems” (see also section 8.4.6 for the BAST classification scheme).

8.4.3 Japan

Influenced by Google’s lobbying at the state level in the United States, Japan has begun to exhibit more interest in autonomous vehicles. Japan is renowned both for its robotic technologies and its low-carbon vehicle technologies. In 2013, Nissan received approval from the Japanese authorities to test its self-driving car, the Nissan Leaf. The Leaf is the first car that combines an electric motor with an advanced driver assistance system [3]. Kanagawa Governor Yuji Kuroiwa and Nissan Vice Chairman Toshiyuki Shiga tested the car on the Sagawa Expressway near Yokohama [38]. Prime Minister Shinzo Abe also has tested several “self-driving cars” produced by Japanese manufacturers Toyota, Honda, and Nissan and has claimed that he senses “that the Japanese technology is the world’s best” [39]. “In particular, in tough driving conditions such as tight curves and lane changing using autonomous driving, I think our Japanese technologies are among the world’s best” [37]. The competition to be a leader in the field is clearly heating up and politicians are lending their visibility and weight to support this emerging technology.

8.4.4 United Kingdom

The situation of the United Kingdom is emblematic of the situation in many European states. There is growing concern that national automobile developers are being hampered by regulatory restrictions and lack of a clear political strategy for autonomous vehicles. A September 2013 advice of the British Houses of Parliament, Parliamentary Office of Science & Technology notes, “There is no explicit legislation which governs autonomous vehicles on UK roads”. The advice further laments: “At present there is no published strategy for the adoption of autonomous vehicles in the UK” [29]. As is the case with several other European member states, steps to improve the possibilities for testing are being taken. The British Ministry of Science and Universities has designated £6 million for research and technology into autonomous vehicle technologies and the Department for Transport is permitting trials on public roads.

8.4.5 Sweden

Sweden is an early pioneer of self-driving technology. The Swedish Government signed a memorandum of understanding with Volvo to allow ordinary people to use self-driving

cars. The project involves the Swedish Transport Administration, Lindholmen Science Park and the City of Gothenburg. It is the first project that aims at testing autonomous vehicles on a larger scale with regular citizens. The project which started in 2014 aims at putting 100 autonomous vehicles onto a 50 km long road in Gothenburg by 2017/ 2018. It also sets the year 2020 as a timeline for when the first autonomous cars will be available for general usage [28].

The collaboration between the Swedish government and Volvo in this project suggests that in Sweden there is political recognition of the potential importance of this new technology. Swedish public officials highlight not only the safety dimensions of the new technology but also other sustainability factors. Ms. Catharina Elmsäter-Svärd, the infrastructure minister listed the many challenges to be tackled in the years to come that would be addressed by autonomous vehicles. These included environment, climate change, space, and traffic safety. In Europe, there appears to be a stronger linking of broad sustainability themes to driver-less cars than is the case in the United States [50].

Claes Tingvall from the Swedish Transport Administration explained why co-operation between the government and Volvo makes sense. Such co-operation can help address legislative questions regarding the new technology early on. At the same time, the societal benefits from the new technology can be incorporated into policy more generally: “We can make traffic as a whole safer, smoother, less polluting, but also try to build infrastructure in a quite different way”. Minister Elmsäter-Svärd noted: “This project is very unique and the expectation from the Swedish government is still to be in the lead when it comes to road safety. We know that livability, environment issues and also road safety is so close together in the project.” Noteworthy, is that the inscription on the Volvo self-driving car states: “Drive Me. Self-driving cars for sustainable mobility” [50].

8.4.6 Germany

In Germany, autonomous driving vehicles are in the testing phase. For public demonstration purposes, the former Minister for Research and Development, Annette Schavan tested the autonomous driving vehicle, “MadeInGermany”, developed at Freie Universität Berlin. AutoNOMOS – Autonomie- und Fahrerassistenzsysteme für Pkw und Lkw – was supported with 2.2 Million euros by the Research Ministry. In an interview, Minister Schavan mentioned the necessity for further innovation of the technology as it could enhance the mobility of elderly and handicapped people [41]. Apart from AutoNOMOS, various other research projects in Germany have helped to advance an increase in automation towards autonomous driving, including the Technical University of Braunschweig’s Stadtpilot and TU Darmstadt’s Conduct-by-Wire projects [46], [47].

The research ministry, which is interested in supporting innovative technologies and advancing technological niches, has set incentives to promote research on autonomous driving. The ministry’s high-tech mobility strategy stresses links among energy policy, e-mobility and intelligent logistics. It further stresses the role of ICT applications in the

automotive industry, although it does not focus explicitly on autonomous driving [11]. Not only has the research ministry funded research on autonomous driving, there are currently more projects underway funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, one of which is the project aFAS. It is set up to develop a driverless vehicle to protect construction sites on highways [45].

The Federal Highway Research Institute has – similarly to the NHTSA – elaborated a nomenclature to facilitate the legal assessment of different degrees of automation. The nomenclature distinguishes “driver only” and “assisted” systems from systems with “partial automation” (the system takes over lateral and longitudinal control in certain situations), “high automation” (the driver does not need to continuously monitor the system) and “full automation” (the system fully takes over lateral and longitudinal control) [25]. This categorization is widely accepted by German experts, bureaucrats, and political stakeholders.

The German automotive industry has begun pushing for change. Partnering with Nokia, Mercedes-Benz responded to the Google challenge in August 2013 with the S 500 Intelligent Drive Autonomous Car long-distance test drive. Following the path Bertha Benz travelled in her historic 1888 long-distance road trip, the S 500 Intelligent Drive vehicle successfully drove on its own between Mannheim and Pforzheim (with a driver behind the wheel as a back-up). Audi, BMW, and auto-suppliers Bosch and Continental Automotive Systems are working on autonomous and semi-autonomous vehicle technologies as well [40].

The German government has not, however, responded with new regulatory initiatives or an explicit strategy to push the implementation of autonomous driving. Rather, governmental actors are focused on other technology options that rather conform to European discourses of sustainable mobility. These are linked to the broader over-arching policy towards a low-carbon energy transformation. E-mobility, for example, is not only backed by a strategic governmental document but is also repeatedly affirmed in speeches by high-level politicians, including the chancellor [9], [10].

The VDA is one of the technology’s strongest proponents lobbying for regulatory change. It is one of the few actors that has expressed a clear vision for autonomous driving in its publications. The VDA has organized conferences centered on vehicle automation, the connected car and autonomous driving. The VDA envisions autonomous driving to be a widespread reality in the future. The association has illustrated concrete steps to be taken on the way towards a self-driving future, such as Lane Changing Support, improved human-machine-interface, and longitudinal guiding assistance [48]. In addition, supply companies have an interest in pushing a higher degree of automation in vehicles and, consequently, autonomous driving [6].

The main national arena addressing autonomous driving is a round table initiated and run by the Transport Ministry. On the working level, the participants are trying to institutionalize a stakeholder dialogue as a first step in getting the issue more strongly on the German policy agenda. The approximately 45 round table members meet twice a year. They consist of representatives of the German Association of Automotive Industry (Verband der

Automobilindustrie, VDA), representatives of automotive manufacturers, the Ministry of Transport, the Federal Highway Research Institute (BAST), the Federal Motor Transport Agency (KBA), the Ministry of Justice, the Ministry of Economy and Energy, representatives of science and research (e.g. Fraunhofer Institute, German Aerospace Center (DLR), Universities) and associations (such as the Association of International Motor Vehicle Manufacturers (Verband der internationalen Kraftfahrzeughersteller, VDIK), the German Insurance Association (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, GDV), the German Automobile Club (Allgemeiner Deutscher Automobilclub, ADAC), and the Association of the Technical Control Boards (Verband der TÜVs)). Three working groups have been established and meet four times a year. The working groups are concerned with legal questions, issues tied to drivers and vehicles including type approval, and research.

The focus on type approval – the procedure whereby an EU Member State certifies that a type of vehicle, system, component or separate technical unit satisfies the relevant administrative provisions and technical requirements [23] – in the second working group on driver and vehicle shows that the round table aims at dealing with many issues at a technical and rather low regulatory level (compared to more general legal questions that would require changes in regulatory law or in the road traffic act). Many aspects of automation do not touch upon regulated aspects and would be generally allowed since they are not defined under the UNECE system. Higher level legal aspects would be in the realm of the Ministry of Justice but are currently not dealt with.

The topics discussed at the round table address highly automatized vehicles but tend not to address fully automated driving technologies. The round table talks are to some degree strategic in that they aim at putting or keeping the topic on the policy agenda. It is not so much about visions but about attempts to show progress in practice. However, the whole process is neither very transparent, nor very visible – meeting discussions are not documented for the general public and societal stakeholders are not widely included. There is also little exchange with European platforms on autonomous driving.

Different views regarding the importance of amending the Vienna Convention were expressed in Germany. The amendment was welcomed by Thomas Weber, head of group research at Daimler and head of development at Mercedes-Benz who was quoted as saying: “Today I am only allowed to take my hands off the wheel to a limited extent. Thankfully the Vienna Convention on Road Traffic has been changed” [40]. Other German experts did not see the convention as so much of a hindrance in relation at least in regard to highly, but not fully-automated vehicles. By definition, in highly automated vehicles, a driver would always be expected to be present and able to take over control and monitor traffic as expected by current legislation. These experts considered amendments to public regulatory law, which have not yet occurred, to be more important [25], [43]. In a personal interview, Dr. Christoph Hecht from the German Automotive Club, ADAC, representing the consumer perspective explained that a customer has no incentive to buy a highly automated vehicle unless they are allowed to make use of it.

8.5 Analysis

Autonomous driving is only slowly emerging as a concept known to all but a small community of experts. It is not deeply anchored in European mobility discourses, strategies, or outlooks. Yet there is some linking of autonomous driving technologies to other strategic concerns, including competitiveness of the automotive industry, sustainable mobility, safety, and the elderly. The framing of autonomous driving varies by national context, reflecting the dominant concerns of different regions. In the United States, where there are over 30,000 traffic deaths each year, safety issues are brought to the fore. In Japan, which has been faced by a long economic slump, competitiveness is a top priority. In Sweden, autonomous driving is being linked to sustainable mobility. In Germany, it is high-end automobiles that are being fitted with autonomous driving technology, suggesting the importance of being at the technological cutting edge in the luxury automobile market. As autonomous vehicle technologies advance, debates in Europe and abroad may shift, but for the time being it appears that the commercialization and wide-spread use of fully automated driving vehicles remains a distant vision.

Innovations in autonomous driving technologies are being presented as important for technological leadership in the automobile sector across all of the jurisdictions examined here even if autonomous vehicles are not yet seen as commercially viable.

In the United States, regulatory competition is emerging among states eager to be seen as frontrunners in systems that could make traffic safer and traffic flows smoother. State-level actors are boasting their regulatory initiatives to show their state's technological leadership. Leadership in realizing "science fiction" visions may be important for long-term competitiveness. This could either be seen as a kind of "Delaware effect", with states competing to attract industries to their region with the provision of favorable regulatory environments, or conversely, a "California effect," where states compete with each other by establishing the more advanced regulatory standards to promote technological innovation and competitive advantage within their own states [49].

In Japan, politicians are sending the message to consumers (both domestic and overseas) that autonomous driving technologies can be linked to Japanese technological strengths in robotics, electro-mobility and energy efficiency, to produce next generation automobiles. The Swedish government is among the most ambitious in its aim to commercialize autonomous driving vehicles by 2020 and set "sustainable mobility" into motion.

The German government has done little to initiate broader discussions about autonomous driving. While the Transport Ministry has organized a stakeholder platform at the national level, it has not tried to stimulate wider public debates at the German national level or as part of official consultations at the European level. The main push for greater discussion and strategizing has come from stakeholders. Volvo, for example, has been quite active at the EU level as has the German automobile association (VDA). Also component suppliers such as Continental and ICT companies have lobbied for more support.

Although by no means definitive, the research conducted here suggests some other interesting patterns that deserve further attention as well as some soft and preliminary conclusions.

First, the kind of regulatory competition seen in the United States, may be spreading to the international level as countries vie with each other for technological leadership in a newly emerging field. Autonomous driving is not only about the automotive industry but about many other industrial branches that will profit from a higher degree of automation such as component suppliers. This is why there is a growing interest in promoting locational advantages and why political commitments are starting to be made in some countries to support certain development paths.

Second, smaller automobile companies (e. g. Volvo, Nissan) and non-traditional players (e. g. Google) moved earlier with autonomous vehicle technologies to gain public and political attention compared with the bigger, more established automotive manufacturers (including German manufacturers). One might read into this that given that autonomous driving technologies are still at early stages of development, larger companies have been wary about taking reputational risks with still unproven technologies. Smaller companies may be more willing to take such risks since they are dependent on leadership advantage. Geels argues that incumbent firms' interest in radical and transformative change is generally not very high since incumbents have typically sunk investments in existing technologies, skills, and people. He further points to the characteristics of more radical changes being riskier and leading to changes that may not match existing competencies [27].

Third, autonomous vehicles are portrayed as highly innovative and demonstrative of a nation's technological (and economical) leadership capabilities by stakeholders, yet political leaders have not played much of a role in trying to promote autonomous vehicle technology in public. Fully automated vehicle technology is in an early development stage. How it fits into dominant strategic visions for mobility or how realistic commercialization of the technology is, is still not clear which may explain why only limited political actions have been taken.

Fourth, the Zero-Accident-Vision has been an important message for developers of autonomous vehicles and component suppliers. The vision appears to play a larger role in the United States where there are higher fatality rates than is the case in Europe or Japan although in all countries considered, greater use of remote sensing and other technologies is seen as a means of improving traffic safety.

Fifth, links to efficiency and environmental protection are found in all countries, but are especially strong in Japan and Europe. And within Europe, Sweden is pursuing this image quite aggressively.

Sixth, there are many unsolved questions with regard to accountability, data protection, the legal framework as well as social and ethical considerations. These issues are only slowly beginning to be debated. The possible impacts of autonomous driving on mobility behaviours and human-machine interactions as well as data protection and acceptance aspects will need to be studied and addressed. Indeed, nowhere has there been much political attention paid to the societal implications of greater use of autonomous vehicle

technologies even though there are many non-technical aspects that must be considered (Ch. 29). These include the development of appropriate regulations covering technological, safety, and liability standards as well as rules of the road for autonomous vehicles. There remain also many unanswered questions with regard to public regulatory law, licensing law and liability law in the countries considered (Ch. 25).

Seventh, perhaps reflective of the fact that autonomous vehicles are still only in early pilot testing phases, few efforts have been made to develop future mobility scenarios in which autonomous driven vehicles play a central role (Ch. 11). In Europe, the driverless-car vision has not been embedded in an overall strategy for realizing sustainable mobility.

Finally, where the most governmental activity can be seen is in providing support for research and development of autonomous vehicle technologies. States that are lagging behind technologically are scrambling to catch up by supporting more research and development. There are still critical technical issues that need further developing before a wide-scale application of autonomous driving can be considered and this provides opportunities for new entrants. There are also uncertainties regarding which technologies may win out in the long run.

8.6 Conclusion

Since there are already numerous technological solutions being implemented that are linked to various societal goals (e. g. e-mobility, intermodal solutions, strengthening public transport), autonomous driving will have to be debated in the context of these (competing or complementary) technological paths. Discussions about future mobility possibilities and the role that could be played by autonomous or partially or highly automated vehicles should be more inclusive. It should not be restricted to an arena primarily concerned with technical and legal questions such as the round table in Germany. Other stakeholders such as non-governmental organizations or think tanks could be integrated into existing structures (stakeholder platforms, legal processes, etc.), but new arenas could also be created. In parallel, advisory bodies could be set up to assess not only technological advancements and needs, but also social, environmental, and regulatory implications of greater use of autonomous driving technologies.

References

1. Aldana, K.: U.S. Department of Transportation Releases Policy on Automated Vehicle Development. <http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/U.S.+Department+of+Transportation+Releases+Policy+on+Automated+Vehicle+Development>. Accessed 21 July 2014
2. Brown, E.G.: Governor Brown Signs Bill to Create Safety Standards for Self-Driving Cars. <http://gov.ca.gov/news.php?id=17752>. Accessed 10 July 2014
3. Beissmann, T.: Nissan Leaf becomes Japan's first road-legal autonomous vehicle. <http://www.caradvice.com.au/253761/nissan-leaf-becomes-japans-first-road-legal-autonomous-vehicle/>. Accessed 10 July 2014

4. CARS 21 High Level Group on the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union: Final Report 2012, 6 June 2012
5. Clark, M.: States take the wheel on driverless cars. <http://www.usatoday.com/story/news/nation/2013/07/29/states-driverless-cars/2595613/>. Accessed 10 July 2014
6. Continental: Automated Driving: Adapting the Legal Framework in Line with Market Dynamics. http://www.continental-corporation.com/www/pressportal_com_en/themes/press_releases/1_topics/automated_driving_en/pr_2014_07_07_zulieferer_innovativ_en.html. Accessed 10 July 2014
7. Convention on Road Traffic. http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/Conv_road_traffic_EN.pdf. Accessed 21 July 2014
8. Department of Motor Vehicles: Autonomous Vehicles. <http://www.dmvnv.com/autonomous.htm>. Accessed 21 July 2014
9. Die Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, August 2009. http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf. Accessed 10 July 2014
10. Die Bundesregierung: Rede von Bundeskanzlerin Merkel bei der Internationalen Konferenz „Elektromobilität bewegt weltweit“, Berlin, 27. Mai 2013. <http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Reden/2013/05/2013-05-27-merkel-elektromobilitaet.html;jsessionid=AE3DA68C72591889A70E1C05B8F4C0D2.s2t2?nn=437032>. Accessed 10 July 2014
11. Die Bundesregierung: Fahrzeug und Verkehrstechnologien. <http://www.hightech-strategie.de/de/325.php>. Accessed 10 July 2014
12. Edler, J. Kuhlmann, S. Smits, R.: New Governance for Innovation. The Need for Horizontal and Systemic Policy-Coordination, Report on a Workshop held at the occasion of the 30th anniversary of the Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), Karlsruhe, November 2002. Fraunhofer ISI Discussion Papers Innovation System and Policy Analysis, No. 2 (2003)
13. Edquist, C.: Systems of Innovation Approaches – Their Emergence and Characteristics. In: Edquist, C. (ed.) *Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organisations*, pp. 1–35. Pinter Publishers/Cassell Academic, London (1997)
14. Edquist, C. Innovation Policy – A Systemic Approach. In: Archibugi, D., Lundvall, B.Å. (eds.) *The Globalizing Learning Economy*. Oxford Scholarship Online (2003) DOI:10.1093/0199258171.003.0013
15. Edquist, C., Hommen, L., Johnson, B., Lemola, T., Malerba, F., Smith, K.: *The ISE Policy Statement: The Innovation Policy Implications of the ‘Innovation Systems and European Integration’ (ISE) Research Project*, University of Linköping, Linköping (1998)
16. Ertico ITS Europe: Towards Futurama – Developments in Road Transport Automation. <http://www.ertico.com/towards-futurama-developments-in-road-transport-automation/>. Accessed 10 July 2014
17. European Commission: Communication from the Commission. Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. COM(2010) 2020 final
18. European Commission: White Paper. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. COM (2011) 144 final
19. European Commission: Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Research and innovation for Europe’s future mobility. Developing a European transport-technology strategy. COM (2012) 501 final
20. European Commission: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. CARS 2020: Action Plan for a competitive and sustainable automotive industry in Europe. COM (2012) 636 final

21. European Commission: Horizon 2020 Work Programme 2014–2015. 11. Smart, green and integrated transport. European Commission Decision C (2013)8631 of 10 December 2013
22. European Commission: Horizon 2020 Work Programme 2014–2015. 5. Leadership in enabling and industrial technologies. European Commission Decision C (2014)2690 of 29 April 2014
23. European Parliament and the Council of the European Union: Directive 2007/46/EC of 5 September 2007 establishing a framework for the approval of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles
24. European Parliament and the Council of the European Union: Directive 2010/40/EU of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport
25. Federal Highway Research Institute: Legal consequences of an increase in vehicle automation. Consolidated final report of the project group, Part 1., Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach http://www.bast.de/DE/FB-F/Publikationen/Download-Publikationen/Downloads/F-legal%20consequences.pdf?__blob=publicationFile. Accessed 10 July 2014
26. Geels, F. W.: From Sectoral Systems of Innovation to Socio-Technical Systems. Insights About Dynamics and Change from Sociology and Institutional Theory. *Research Policy*, 33, 897–920. (2004)
27. Geels, F.: Reconceptualising the co-evolution of firms-in-industries and their environments: Developing an inter-disciplinary Triple Embeddedness Framework. *Research Policy* 43, 261–277 (2014)
28. Grünweg, T.: Pilotprojekt “Drive Me”: Geisterfahrt in Göteborg. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/autonomes-fahren-pilotprojekt-drive-me-von-volvo-in-goeteborg-a-972134.html>. Accessed 10 July 2014
29. Houses of Parliament, Parliamentary Office of Science & Technology: Autonomous Road Vehicles. PostNote, No. 443 (2013)
30. Jänicke, M. and Lindemann, S.: Governing Environmental Innovations: a new role for the nation state. *Global Environmental Politics*. 4(1), 29–47 (2010)
31. Jacob, K., Beise, M., Blazecjzak, J., Edler, D., Haum, R., Jänicke, M., Löw, T., Petschow, U., Rennings, K.: Lead Markets for Environmental Innovations. Heidelberg: Physica. ZEW Economic Studies 27 (2005)
32. Jacob, K., Jänicke, M.: Lead Markets for Environmental Innovations. A New Role for the Nation State. *Global Environmental Politics*. 4 (1), 29–46 (2004)
33. Kim, M.K., Heledii, Y., Asheriji, I. Thompsoniy, M.: Comparative analysis of laws on autonomous vehicles in the U.S. and Europe. http://www.auvsishow.org/auvsi2014/Custom/Handout/Speaker8657_Session789_1.pdf. Accessed 21 July 2014
34. Martini, C.: Seminar explored policy and legal implications surrounding the adoption of autonomous driving in Europe. Press release. <http://pr.euractiv.com/pr/adoption-autonomous-driving-europe-debate-starts-eu-level-97552>. Accessed 21 July 2014
35. Miethling, B.: Politische Triebkräfte der Innovation. Peter Lang, Frankfurt am Main (2012)
36. Negro S.O.: Dynamics of Technological Innovation Systems. The Case of Biomass Energy. Labor Grafimedia, Utrecht (2007)
37. Nissan: Japan Prime Minister Abe Goes Public with Autonomous Drive Car. <http://reports.nissan-global.com/EN/?p=13496>. Accessed 10 July 2014
38. Prigg, M.: Nissan’s ‘Tron’ self-driving car becomes first to be allowed on Japanese highways. <http://www.stuff.tv/google/nissan-dumps-driver-self-driving-cars-becomes-first-be-allowed-japanese-roads/news>. Accessed 21 July 2014
39. Quigley, J.T.: Japanese Prime Minister “Test Drives” Autonomous Vehicles. <http://thediplomat.com/2013/11/japanese-prime-minister-test-drives-autonomous-vehicles/>. Accessed 10 July 2014

40. Reuters: Cars could drive themselves sooner than expected after European push. <http://www.reuters.com/article/2014/05/19/us-daimler-autonomous-driving-idUSKBN0DZ0UV20140519>. Accessed 21 July 2014
41. Rothmund, S.: Ministerin testet selbststeuerndes Fahrzeug. http://www.fu-berlin.de/campusleben/newsletter/1209/1209_schavan.html. Accessed 10 July 2014
42. Schorsch, P.: Rep. Jeff Brandes' 'Google Car' Legislation Drives Forward. <http://stpete.patch.com/groups/peter-schorsch-s-blog/p/bp--rep-jeff-brandes-google-car-legislation-drives-forward>. Accessed 10 July 2014
43. Smith, B.W.: Automated Vehicles are Probably Legal in the United States. The Center for Internet and Society, CIS, Stanford (2012)
44. Smith, B.W.: SAE Levels of Driving Automation. <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/12/sae-levels-driving-automation>. Accessed 10 October 2014
45. Stolte, T., Bagschik, G., Reschka, A. and Maurer, M.: Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen (aFAS) Konferenzbeitrag beim 16. Braunschweiger Symposium AAET 2015 am 12./13. Februar 2015. http://www.its-nds.de/media/veranstaltungen/aaet/AAET_2015_Programm_Screen_Ausfuellbar2.pdf. Accessed 10 March 2015
46. Technical University Braunschweig: Das Projekt Stadtpilot. <https://www.tu-braunschweig.de/stadtpilot>. Accessed 10 March 2015
47. Technical University Darmstadt: Mit dem Fahrzeug gemeinsam fahren – Conduct-by-Wire 2. http://www.iad.tu-darmstadt.de/forschung_15/forschungsschwerpunkte_1/fahrzeugergo_1/conductbywire_6.de.jsp. Accessed 10 March 2015
48. VDA: Vernetzung. Die digitale Revolution im Automobil. http://www.vernetzung-vda.de/upload/vda05/downloads/magazin/VDA_Magazin_Vernetzung.pdf. Accessed 10 July 2014
49. Vogel, D.: Trading Up: Consumer and Environmental Regulation in a Global Economy. Harvard University Press, Cambridge (1995)
50. Volvo Car Germany 2013 <https://www.media.volvocars.com/de/de-de/media/videos/136535/drive-me-selbstfahrende-autos-fr-eine-nachhaltige-mobilitaet-newsfeed>. Accessed 10 July 2014
51. Weiner, G. and Smith, B.W.: Automated Driving: Legislative and Regulatory Action. cyberlaw.stanford.edu/wiki/index.php/Automated_Driving:_Legislative_and_Regulatory_Action. Accessed 17 June 2014
52. Whaley, S.: Gov. Sandoval 'Taken For Ride' In Google Self-Driving Car. <http://www.nevadanews-bureau.com/2011/07/20/gov-sandoval-%E2%80%98taken-for-ride%E2%80%99-in-google-self-driving-car/>. Accessed 10 July 2014

Barbara Lenz, Eva Fraedrich

Inhaltsverzeichnis

9.1 Einleitung 176

9.2 Carsharing: „Kernapplikation“ neuer Mobilitätskonzepte 177

 9.2.1 Stationsbasiertes Carsharing 178

 9.2.2 Flexibles (One Way) Carsharing 179

 9.2.3 Peer-to-Peer Carsharing 180

9.3 Nutzer und Nutzung der neuen Mobilitätskonzepte 180

 9.3.1 Nutzer und Nutzungsvoraussetzungen 181

 9.3.2 Der Carsharer – der „neue Mensch“ in einer Sharing Economy? 181

9.4 Digitalisierung der Alltagswelt als Grundvoraussetzung
 für neue Mobilitätskonzepte 183

9.5 Weiterentwicklung der neuen Mobilitätskonzepte
 durch Automatisierung des Carsharing? 184

 9.5.1 Autonomes Valet-Parken im Carsharing 185

 9.5.2 Carsharing unter Einsatz von „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ 186

 9.5.3 Das Carsharing-Fahrzeug als Vehicle-on-Demand 187

 9.5.4 Zwischenfazit 188

B. Lenz (✉)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrsforschung, Deutschland
Barbara.Lenz@dlr.de

E. Fraedrich
Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Deutschland
eva.fraedrich@geo.hu-berlin.de

9.6 Neue Mobilitätskonzepte jenseits von Carsharing:	
Hybridisierung des öffentlichen Verkehrs?	189
9.6.1 Neugestaltung von Intermodalität und Flexibilisierung des öffentlichen Verkehrs .	190
9.6.2 Individualisierung des öffentlichen Verkehrs	191
9.6.3 Verdichtung der Bedienungsmöglichkeiten mit öffentlichem Verkehr	192
9.7 Implementierung von neuen Mobilitätskonzepten mit autonomen Fahrzeugen	192
9.8 Fazit	193
Literatur	194

9.1 Einleitung

Verkehr ist Ausdruck der Befriedigung von Mobilitätsbedürfnissen mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln – im Alltagsverkehr sind Menschen zu Fuß, mit dem Fahrrad, den Verkehrsmitteln des öffentlichen Verkehrs oder dem Pkw unterwegs. Dabei werden zwei große Gruppen unterschieden: Personen mit einer ausgeprägten Präferenz für die Nutzung des privaten Pkw einerseits und Personen mit einer Vorliebe für den sogenannten „Umweltverbund“, d. h. für die Kombination aus öffentlichem Personenverkehr (ÖPV), Fahrrad- und Fußwegen, andererseits [1]. Zusätzlich bildet sich seit einigen Jahren die Gruppe der „Multimodalen“ heraus, die nicht mehr auf ein spezifisches Verkehrsmittel oder einen bestimmten Verkehrsmittelmix ausgerichtet sind, sondern in ihrem persönlichen Repertoire der Verkehrsmittelnutzung eine große Bandbreite aufweisen [1, 2]. Dieser allmähliche Verhaltenswandel fällt mit der Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte zusammen, die zum einen Weiterentwicklungen des klassischen Carsharing darstellen [3], zum anderen etablierte Mitfahrgelegenheiten um neue Formen ergänzen. Zu den bereits realisierten neuartigen Konzepten gehören flexible Carsharing-Flotten wie die von Car2Go, DriveNow oder Multicity, die als Mobilitätsdienstleistungen in Großstädten in Deutschland, aber auch in zahlreichen Städten Europas und der USA zur Verfügung stehen. Parallel dazu entwickeln sich sogenannte Peer-to-Peer-Angebote, in denen private Fahrzeugbesitzer über eine Internet-Plattform ihr Fahrzeug für eine Mitglieder-Community bereitstellen. Auf Internetplattformen wie Mitfahrzentrale oder Zimride bieten Privatpersonen Mitfahrgelegenheiten auf Strecken und zu Zeiten an, auf bzw. zu denen sie selbst ohnehin unterwegs sind. Zusätzlich etablieren sich derzeit auch mehr und mehr Angebote, wie z. B. Uber oder Lyft, bei denen die Unterscheidung zwischen (semi-)professioneller Personenbeförderung, vergleichbar mit einer Taxidienstleistung, und „klassischer“ Mitfahrgelegenheit nicht immer einfach ist. Die neuen Formen von Carsharing und Mitfahrdiensten entstehen vor allem in den großen Städten und Metropolregionen der Industrieländer.

Das Neue und gleichzeitig auch das Besondere an solchen neuen Mobilitätskonzepten besteht in dem hohen Maß an Flexibilität, das diese Konzepte den Nutzern bieten. Fahrzeuge des flexiblen Carsharing sind ohne Vorplanung zu einem beliebigen Zeitpunkt und

für eine beliebige Dauer verfügbar. Ähnlich flexibel sind die neuen Mitfahrdienste, sie gleichen dabei allerdings dem konventionellen Taxi. Eine wesentliche Voraussetzung für die Entstehung aller neuen Mobilitätskonzepte sind die Möglichkeiten, die heute hinsichtlich der Vernetzung von Fahrzeugen, Nutzern und Betreibern mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien vorhanden sind. Dadurch wird ein grundsätzlich einfacher und schneller Zugriff auf Fahrzeuge oder Dienste mittels Internet oder Smartphone-App überhaupt erst möglich. Dennoch bleibt grundsätzlich der Zugang im Sinne der physischen Distanz zwischen dem Standort des Nutzers und dem des Fahrzeugs als Nutzungshürde bestehen, insbesondere in Gebieten, in denen die Fahrzeugdichte nicht sehr hoch ist.

Mit der Einführung von autonomen Fahrzeugen erscheint es möglich, die bestehenden Konzepte deutlich zu erweitern und auszudifferenzieren: Der Zugriff auf und Zugang zum Fahrzeug verändern sich, indem nicht mehr der Nutzer zum Fahrzeug, sondern das Fahrzeug zum Nutzer kommt; die Fahrzeuge selbst werden für einen erweiterten Personenkreis wie z. B. mobilitätseingeschränkte Menschen nutzbar; neue Formen von öffentlichem Verkehr sind denkbar, auch im Sinne einer weiteren Aufweichung der Grenzen zwischen Individualverkehr und öffentlichem Verkehr.

Der vorliegende Beitrag hat das Ziel, diese Optionen und die damit verbundenen Erwartungen vorzustellen. Dabei konzentrieren sich die Ausführungen und die Diskussion auf das Carsharing. In einem ersten Schritt wird der derzeitige Stand von Angebot und Nutzung der sogenannten „Neuen Mobilitätskonzepte“, bei denen das Carsharing den Kern bildet, dargestellt. Den Hauptteil des Beitrags bildet die Diskussion zu den Chancen und Herausforderungen, die sich durch die Einführung von autonom fahrenden Fahrzeugen in Carsharing-Flotten ergeben würden. Derzeit gibt es eine Reihe von Anzeichen dafür, dass Spontaneität und Flexibilität eine besonders hohe Bedeutung für die Nutzung der neuen Mobilitätskonzepte haben könnten (vgl. [11, 13]). Genau an dieser Stelle, nämlich der Erhöhung von Spontaneität und Flexibilität, könnten neue Mobilitätskonzepte mit autonomen Fahrzeugen ansetzen. Entsprechende Überlegungen sind bei Betreibern von flexiblen Carsharing-Flotten bereits im Entstehen [4].

9.2 Carsharing: „Kernapplikation“ neuer Mobilitätskonzepte

Carsharing gibt es in Deutschland und zahlreichen anderen Ländern etwa seit den 1980er-Jahren. Unter Carsharing wird hier der Betrieb einer Pkw-Flotte verstanden, die entweder stationsbasiert oder Punkt-zu-Punkt verfügbar ist. Jeder Inhaber und jede Inhaberin einer gültigen Fahrerlaubnis kann sich als Mitglied einer Carsharing-Organisation – in der Regel bei gleichzeitiger Entrichtung einer Anmeldegebühr – registrieren lassen und erhält damit Zugang zu den Fahrzeugen. Die wesentlichen Variationen des Carsharing ergeben sich aus den räumlichen und zeitlichen Zugriffsbedingungen auf die Fahrzeuge sowie aus den Geschäftsmodellen; Abb. 9.1 fasst die Ausprägung der verschiedenen Konzepte in ihren Grundzügen zusammen.

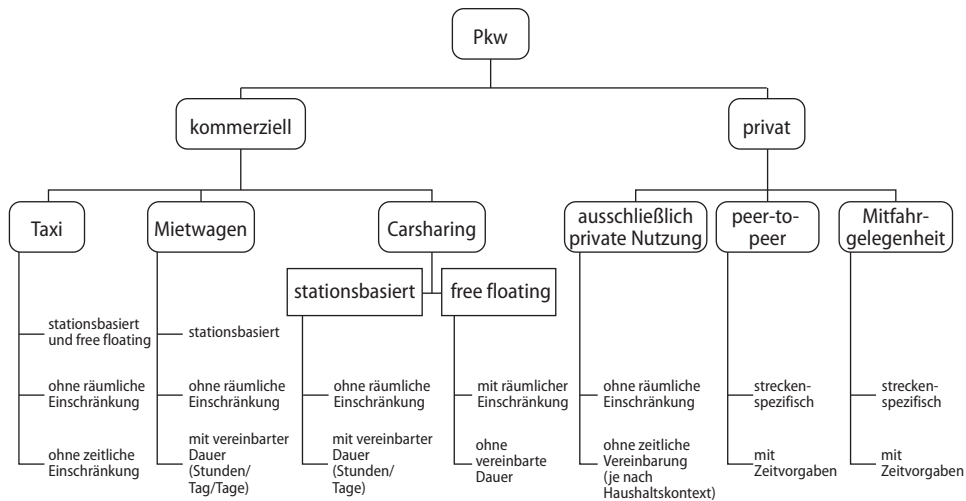


Abb. 9.1 Systematik zur Pkw-Nutzung im Spannungsfeld zwischen privatem und kommerziellem Einsatz

9.2.1 Stationsbasiertes Carsharing

Die klassische Form des Carsharing ist das stationsbasierte Carsharing, d.h., an einem „Sammelpunkt“ werden die Fahrzeuge bereitgestellt. Der Nutzer muss das Fahrzeug dort abholen und auch wieder dorthin zurückbringen. Die Dauer der Nutzung wird vorab vereinbart. Im Unterschied zum klassischen Mietwagen können die stationsbasierten Carsharing-Fahrzeuge nicht nur tage-, sondern auch stundenweise entliehen werden; allerdings gibt es zunehmend auch bei Mietwagen-Anbietern die Möglichkeit zur stundenweisen Anmietung eines Fahrzeugs. Die Nutzer zahlen eine jährliche Grundgebühr; für die Fahrzeugnutzung wird ein aus Mietdauer und gefahrener Entfernung abgeleitetes nutzungsabhängiges Entgelt erhoben, das je nach Organisation und Anbieter variiert und auch der Nachfrage entsprechend an Tageszeit und Wochentag angepasst sein kann. Ein Geschäftsgebiet ist nicht festgelegt. In der Anfangszeit fand die Reservierung der Fahrzeuge überwiegend telefonisch statt, heute erfolgen Buchungen auch über die Anbieter-Website oder über Anwendungen auf mobilen Endgeräten.

Im Jahr 2014 ist stationsbasiertes Carsharing an circa 3900 Stationen in 380 Städten und Gemeinden Deutschlands verfügbar [5], [6]. Dazu gehört auch eine ganze Reihe mittlerer und kleinerer Städte; in Städten über 100.000 Einwohnern wird schon eine sehr gute Abdeckung erreicht, dagegen gibt es in Deutschland in weniger als 5 Prozent der Kommunen mit einer Einwohnerzahl von unter 50.000 ein Carsharing-Angebot [7]. Zur Bedienung der 3900 Stationen steht eine Flotte mit 7700 Fahrzeugen zur Verfügung, die von etwa 150 Carsharing-Anbietern bereitgestellt wird. Marktführer in Deutschland ist die Deutsche Bahn (Flinkster), der etwa 55 Prozent der stationsbasierten Flotte gehört [8, 9]. Weltweiter

Marktführer im klassischen Carsharing mit einer Flotte von rund 10.000 Fahrzeugen in den USA sowie Kanada, Großbritannien, Spanien und Österreich ist das im Jahr 2000 gegründete amerikanische Unternehmen Zipcar, das inzwischen zur AVIS Budget Gruppe gehört (Stand August 2014).

9.2.2 Flexibles (One Way) Carsharing

In den vergangenen Jahren sind neue Formen von Carsharing entstanden. Als neuen Typ des gewerblichen Carsharing gibt es inzwischen vor allem in Deutschland, aber auch in Großbritannien und den USA, das sogenannte „flexible“ Carsharing, dessen Flexibilität hauptsächlich darin besteht, dass keine vorherige Vereinbarung mit dem Betreiber über Zeitpunkt und Dauer der Nutzung getroffen und das Fahrzeug nicht an einem bestimmten Ort abgeholt und dorthin zurückgebracht werden muss. Vielmehr nehmen die Nutzer das Fahrzeug dort auf, wo sie es antreffen, und geben es an beliebiger Stelle innerhalb des vom Betreiber definierten Geschäftsgebietes ab. Die Informationen über den Standort ausleihbarer Fahrzeuge erhalten die Nutzer aus dem Internet oder über eine Smartphone-App; grundsätzlich kann das Fahrzeug auch *en passant* ausgeliehen werden, d. h., man leiht ein an der Straße geparktes, nicht reserviertes Fahrzeug aus. Auch hier ist die Registrierung beim Betreiber der Flotte Voraussetzung für die Nutzung des Fahrzeugs, die per Chipkarte oder neuerdings direkt über das Smartphone initiiert wird.

Das weltweit führende Unternehmen im flexiblen Carsharing ist Car2Go mit mehr als 10.000 Fahrzeugen in 27 Städten in Europa und Nordamerika (Stand August 2014). In Deutschland verfügen die Anbieter des flexiblen Carsharing über eine Flotte von insgesamt etwa 6250 Fahrzeugen [5], die allerdings fast ausschließlich in großen Städten mit mehr als 500.000 Einwohnern, so beispielsweise in Berlin, Hamburg oder München, angeboten werden. Dabei umfassen die Geschäftsgebiete nicht das gesamte städtische Territorium, sondern sind auf Teile davon beschränkt, hauptsächlich auf das Innenstadtgebiet sowie angrenzende Gebiete und „Inselgebiete“, in denen eine hohe Nutzungsfrequenz gegeben ist. Neben einer einmaligen Anmeldegebühr fallen keine weiteren regelmäßigen Kosten an. Die Nutzung der Fahrzeuge wird über einen zeitabhängigen Nutzungstarif, meist pro Minute, berechnet. Kosten für den Treibstoff sind wie beim stationsbasierten Carsharing in den Tarifen enthalten; darüber hinaus enthält die Nutzungsgebühr die Parkkosten, die üblicherweise als Pauschale direkt zwischen Anbieter und Kommune vereinbart sind.

Flexibles Carsharing startete als Pilotprojekt von Car2Go, einem Unternehmen des Daimler-Konzerns, im Jahr 2009 in Ulm (Baden-Württemberg, Deutschland). Weitere relevante Anbieter sind inzwischen das seit 2011 aktive DriveNow, ein Unternehmen von BMW und der Sixt-Autovermietung, sowie der mit rein batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeugen ausgestattete Dienst Multicity, einer Kooperation von Citroën mit der Deutschen Bahn. Gleichzeitig versuchen sich zunehmend neue Anbieter im Markt, wie beispielsweise Quicar, das der Volkswagen-Gruppe angehört, oder Spotcar von Opel, das im Juni 2014 in Berlin gestartet ist.

9.2.3 Peer-to-Peer Carsharing

Das Peer-to-Peer Carsharing, also das Verleihen des privaten Pkw zwischen Privatpersonen, ist eben erst dabei, sich als dritte Systemform des Carsharing über Vermittlungsplattformen im Internet zu entwickeln. Genaue Nutzerzahlen liegen hierzu noch nicht vor. Die Buchungen werden beim Peer-to-Peer Carsharing über eine Internetplattform abgewickelt. Es gibt für das Abholen und Zurückbringen keine Station, vielmehr wird das Fahrzeug an einem individuell vereinbarten Standort abgeholt bzw. dorthin zurückgebracht. Der Blick auf eine Webplattform wie www.autonetzer.de zeigt, dass diese Form des Carsharing sich keineswegs nur auf die großen Städte beschränkt, sondern auch in kleineren Städten und Kommunen zu finden ist. Darin scheint sich die Vermutung von Hampshire und Gaites ([10], S.14) zu bestätigen, dass es sich bei Peer-to-Peer Carsharing – zumindest derzeit noch im Gegensatz zum kommerziellen Carsharing – um eine skalierbare Form des Carsharing handelt. Dabei ist die Flottenzusammensetzung ausgesprochen dynamisch, da es sich bei der Bereitschaft zum Verleihen des Pkw nicht um eine grundsätzliche Verhaltensweise seitens der Anbieter zu handeln scheint. Vielmehr legen die Ergebnisse einer Untersuchung in Berlin die Annahme nahe, dass die Pkw-Besitzer ihre Fahrzeuge nur in bestimmten Zeiten zur Verfügung stellen, beispielsweise dann, wenn die eigene Nutzung des Pkw aus persönlichen Umständen heraus gering ist [11].

9.3 Nutzer und Nutzung der neuen Mobilitätskonzepte

Die Zielsetzungen, die mit Carsharing verbunden werden, variieren je nach Perspektive der beteiligten Akteure. Seitens der Politik, die in Deutschland hauptsächlich auf kommunaler Ebene in die Bereitstellung der notwendigen Rahmenbedingungen für die Implementierung von Carsharing eingebunden ist, sind die Reduzierung des Verkehrsaufkommens mit dem Pkw (da Carsharing-Nutzer mit der Dauer der Carsharing-Nutzung auch den ÖPV-Anteil innerhalb ihres Modal Split erhöhen) und damit verbunden eine Verringerung der Emissionen von Luftschadstoffen und CO₂ sowie die Minderung des Flächenanspruches des ruhenden Pkw-Verkehrs wesentliche Motive bei der Unterstützung von Carsharing-Initiativen (vgl. Kap. 19). Kommerzielle Betreiber von Carsharing, wie Automobilhersteller (in der Regel in Kooperation mit Autovermietern) oder Mobilitätsdienstleister wie die Deutsche Bahn, verfolgen mit Carsharing produktbezogene Strategien, so u. a. die Erweiterung ihres Leistungsangebotes durch eine (zusätzliche) Mobilitätsdienstleistung oder die Bereitstellung von attraktiven Fahrzeugen ihrer Marke und damit die Erzeugung von Markenbindung. Andere Motive für den Betrieb einer Carsharing-Flotte sind dezidiert ökologische Zielsetzungen, die wesentlich die Entstehung von Carsharing angetrieben haben und die insbesondere von den als Verein oder als Interessengemeinschaft organisierten Gruppen weiterhin aufrechterhalten werden [12], [13].

9.3.1 Nutzer und Nutzungsvoraussetzungen

Die Carsharing-Nutzer des Jahres 2014 bilden eine spezifische Gruppe sowohl hinsichtlich ihrer Zusammensetzung als auch hinsichtlich ihres Mobilitätsverhaltens. Deutlich höher verglichen mit dem Bevölkerungsdurchschnitt sind: der Anteil an Personen unter 40 Jahren, der Anteil an Männern, der Anteil an Personen mit hohem formalem Bildungsstand (Abitur, Fachhochschulreife, Studium) und das Haushaltseinkommen. Diese Differenz zum Bevölkerungsdurchschnitt ist beim flexiblen Carsharing noch stärker ausgebildet als beim stationsbasierten [8], [9]. Beide Typen von Carsharing – stationsbasiert und flexibel – werden kombiniert mit einer weit überdurchschnittlichen Nutzung des öffentlichen Verkehrs. So zeigen Untersuchungen zur Nutzung von Carsharing aus dem Jahr 2014, dass 52 Prozent der Flinkster-Kunden in Berlin und 44 Prozent der Münchner Flinkster-Kunden eine ÖPV-Zeitkarte besitzen. Bei den flexiblen Systemen DriveNow und Car2Go verfügt ebenfalls ein hoher Anteil über ein ÖPV-Abo: Bei DriveNow in Berlin und München sind es 43 Prozent bzw. 38 Prozent ([14], S.12); bei Car2Go haben 40 Prozent der Nutzer in Stuttgart und 50 Prozent der Nutzer in Köln eine Dauerkarte für den öffentlichen Verkehr ([15], S.13); im Bundesdurchschnitt liegt der Anteil der Bevölkerung, die in Kernstädten wohnt und eine Zeitkarte für den öffentlichen Verkehr besitzt, bei 33 Prozent ([1], eigene Auswertung; die amtliche Raumbeobachtung in Deutschland zählt zur Kategorie „Kernstadt“ alle kreisfreien Städte mit mehr als 100.000 Einwohnern).

Ein gut ausgebauter öffentlicher Verkehr oder der Besitz eines eigenen Fahrzeugs scheinen derzeit wesentliche Voraussetzungen für die Nutzung von Carsharing zu sein. In der Variante des flexiblen Carsharing ist nur so eine One-Way-Nutzung möglich. Müsste der Nutzer diejenigen Wege, die nicht mit einem Carsharing-Fahrzeug zurückgelegt werden, selbst anderweitig organisieren, wäre der Aufwand höchstwahrscheinlich hoch und die Attraktivität eines Systems, das die Nutzung einzelner Strecken erlaubt, würde deutlich sinken. Auch im Fall von stationsbasiertem Carsharing bildet der öffentliche Verkehr häufig das hauptsächliche Verkehrsmittel für die Nutzer; vielfach stellt das Carsharing-Fahrzeug auch die bedarfsweise Ergänzung Pkw-besitzender Haushalte um ein weiteres Fahrzeug dar [16]. Um diesen Bedarf zu bedienen und im Sinne einer Symbiose auszunutzen, existieren seit Langem schon Kooperationen zwischen den Anbietern von stationsbasiertem Carsharing und öffentlichen Verkehrsdienstleistungen; eine vergleichbare Zusammenarbeit findet sich auch beim neuen flexiblen Carsharing [17].

9.3.2 Der Carsharer – der „neue Mensch“ in einer Sharing Economy?

Unter dem Schlagwort vom „Nutzen statt besitzen“ wird Carsharing immer wieder als Beispiel für den Wandel der Besitz-Ökonomie hin zu einer Ökonomie des Teilens, einer *Sharing Economy*, herangezogen [18, 19]. Möglicherweise resultiert dies aus der besonderen Offensichtlichkeit des Carsharing als eines Tuns, das im öffentlichen Raum stattfindet. Möglicherweise steht dahinter aber auch das Staunen darüber, dass ein Gegenstand, der

nach wie vor zum Statussymbol taugt, im Verleihverfahren von mehreren, beliebigen Personen genutzt wird.

Tatsächlich reiht sich das Carsharing ein in eine ganze Reihe von Entwicklungen, bei denen „Güter“ auf Leihbasis „geteilt“ werden, die bislang als nicht verleihbar galten: die selbst genutzte Wohnung, der Schrebergarten, das Auto. Ökonomen begründen die Verleihbarkeit (oder Nicht-Verleihbarkeit) eines Gutes mit der Differenz zwischen den entstehenden Transaktionskosten und den Einnahmen, die über den Verleih generiert werden können; entsteht eine positive Differenz, ist der Verleih begründet, und er ist umso interessanter, je höher die Differenz ausfällt [20]. Das Verleihen wird für den Einzelnen jedoch nur dann sinnvoll, wenn er über ein Produkt verfügt, dessen Kapazität er unvollständig nutzt – deshalb der Verleih des eigenen Autos in Standzeiten, der Verleih der Wohnung, solange man selbst im Urlaub ist, der Verleih des privaten Parkplatzes vor dem Haus, während man tagsüber bei der Arbeit ist.

Die Auseinandersetzung mit den Wirkungen eines geteilten Nutzens stammt – zumindest in Deutschland – im Wesentlichen aus der Diskussion um die nachhaltige Nutzung von Ressourcen [21, 22, 23]. Dabei zeigt sich das Sharing auf aggregierter Ebene, d. h. auf regionaler, nationaler oder auch supra-nationaler Ebene, als eine Möglichkeit zur Ressourceneinsparung. Auf individueller Ebene dagegen bedeutet Sharing nicht weniger Konsum, sondern die Möglichkeit zu gleichbleibend hohem oder auch mehr Konsum. Als Beispiel hierfür kann in der Tat das Carsharing angesehen werden, bei dem den Mitgliedern der jeweiligen Organisation eine Vielfalt an Fahrzeugen oder doch mehrere Fahrzeugtypen zur Verfügung gestellt werden. Diese Fahrzeuge bieten eine Breite an Konsumgütern des Typs Fahrzeug, die die Möglichkeiten von Privathaushalten mehrheitlich übersteigen würden, wenn sie diese Bandbreite an Fahrzeugen selbst besitzen wollten. Auf aggregierter Ebene werden weniger Fahrzeuge benötigt (der Bundesverband Carsharing (BCS) gibt an, dass sich – rein rechnerisch – im stationären Carsharing 42 Personen, im flexiblen Carsharing 70 Personen ein Fahrzeug teilen [5]); auf individueller Ebene bleibt damit eine hohe Mobilität gewährleistet.

In den Anfangsjahren war das Carsharing oft verbunden mit einer Einstellung, bei der dem Autofahren als solchem kein „Handlungsnutzen“ zugesprochen wurde – sprich: Auto-Nutzer mit einer entsprechenden Einstellung empfanden keinen Spaß am Autofahren (vgl. [21], S.92). Vielmehr war die Nutzung eher aus einer Einstellung heraus motiviert, die der wachsenden Motorisierung der privaten Haushalte eine wesentliche Mitverantwortung an der Verschlechterung der Umweltbedingungen gab, der die Carsharing-Mitglieder entgegenwirken wollten [12]. Dies hat sich möglicherweise grundlegend geändert. So hat sich das Produkt Carsharing – sowohl in der flexiblen und zunehmend auch in der stationsbasierten Version – zu einem kommerziellen Produkt entwickelt. Darüber hinaus belegen Untersuchungen zur Nutzung von flexiblem Carsharing, dass Aspekte wie „Aufmerksamkeit, erlebte Sympathie, Spaß und Begeisterung“ ganz wesentliche Motive sind (vgl. [24] S.21: Zustimmungsraten zu entsprechenden Aussagen zwischen 38 und 86 Prozent). Damit übernimmt das Carsharing-Fahrzeug bzw. die Carsharing-Nutzung emotionale und psychosoziale Funktionen, die dem Auto bislang nur in Form von Eigentum zugesprochen wurden

[22]. Bardhi und Eckhardt verstehen das „Teilen“ (von den Autorinnen zutreffender als *access-based consumption* bezeichnet) als charakteristisches Merkmal einer *liquid society*, in der feste Bezugssysteme, wie sie auch durch Eigentum entstehen, zunehmend brüchig werden [24].

9.4 Digitalisierung der Alltagswelt als Grundvoraussetzung für neue Mobilitätskonzepte

Die Entwicklung und Erweiterung des Carsharing durch neue Konzepte wie das flexible Carsharing oder auch das Peer-to-Peer Carsharing ist ohne die Verfügbarkeit von Geräten, die einen mobilen Zugriff auf das Internet und Kommunikationsanwendungen wie beispielsweise Apps erlauben, nicht denkbar. Zwar präsentieren alle Anbieter ihr jeweiliges Carsharing-Produkt auch umfangreich im (stationären) Internet; hierbei geht es aber eher um die Information für die (potenziellen) Kunden als um die unmittelbare Nutzung des Dienstes. Für den Zugang zu den Fahrzeugen spielen vor allem die mobilen Anwendungen eine wesentliche Rolle. Sie ermöglichen zunächst die Verortung von Nutzer und Fahrzeug(en) in Echtzeit; damit erhält der Nutzer die notwendige Grundlage, um sich über die Verfügbarkeit eines Fahrzeuges zu informieren und zu entscheiden, ob er den Weg zum Fahrzeug (für den er derzeit je nach Anbieter zwischen 15 und 30 Minuten zur Verfügung hat) zurücklegen will und kann. Im zweiten Schritt ermöglicht die mobile Anwendung die Reservierung des ausgewählten Fahrzeugs und bietet eine Navigation zu diesem Fahrzeug an. Auch das Öffnen des Fahrzeugs erfolgt bei einzelnen Anbietern schon heute über die mobile Anwendung.

Dabei ist die Einsatzmöglichkeit entsprechender Technologien entscheidend davon abhängig, dass die Nutzer ihrerseits über die technische Ausstattung verfügen, mit der sie auf das mobil und digital vermittelte Fahrzeugangebot zugreifen können. Tatsächlich hat der private Besitz von Smartphones in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Während im Jahr 2009 erst knapp 6,5 Millionen Personen in Deutschland ein Smartphone besaßen, sind es heute über 40 Millionen, also fast jede(r) Zweite. Für das Jahr 2014 wird erwartet, dass 97 Prozent der verkauften Handys Smartphones sein werden; gerechnet wird mit dem Verkauf von fast 30 Millionen Geräten [25, 26].

Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die Fertigkeiten im Umgang mit Hard- und Software in allen Gruppen der Bevölkerung zunehmen. So stellt beispielsweise die ARD-ZDF-Onlinestudie 2013 fest, dass die Zahl der Internetnutzer weiterhin expandiert [27]: Im Jahr 2013 waren in Deutschland 54,2 Millionen Personen ab 14 Jahren zumindest gelegentlich online; das sind 77,2 Prozent der Bevölkerung und damit 800.000 Menschen mehr als noch im Vorjahr. Verursacher dieses Wachstums ist ausschließlich die Bevölkerungsgruppe der über 50-Jährigen. Gleichzeitig nimmt die Nutzungsdauer zu: 2013 war der deutsche Internetnutzer im Schnitt 169 Minuten am Tag online, das sind 36 Minuten mehr als im Vorjahr. Einen beträchtlichen Anteil daran hat die Unterwegs-Nutzung des Internets, die im Jahr 2012 erst von 23 Prozent der Nutzer praktiziert wurde, im Jahr 2013 aber bereits von

41 Prozent. Apps werden von fast der Hälfte der Online-Nutzer (44 Prozent) auf unterschiedlichen Endgeräten genutzt [28].

Im verkehrlichen Kontext besonders beachtenswert ist die durch digitale Anwendungen gegebene und durch mobile Endgeräte noch deutlich verstärkte Möglichkeit zur Reduzierung von Planungshorizonten. Spontaneität in der Gestaltung der individuellen Mobilität ist damit eine besonders wichtige Konnotation zum meistgebrauchten Begriff der „Flexibilität“ als spezifischer Eigenschaft der neuen Mobilitätskonzepte. Entsprechend war das mit der höchsten Zustimmung versehene Statement in einer im Jahr 2014 durchgeführten Befragung von Car2Go-Nutzern: „Ich finde an Car2Go attraktiv, dass ich spontan ein Auto nutzen kann, auch wenn ich ohne Auto unterwegs bin“ – 98 Prozent der Befragten stimmten dieser Aussage zu (72 Prozent „trifft genau zu“, 26 Prozent „trifft eher zu“) (vgl. [15], S.20). Damit wird auch der schnelle Erfolg des flexiblen Carsharing nachvollziehbar, das von der (langen) Vorausplanung, wie sie beim konventionellen stationsbasierten Carsharing notwendig war, entbindet und zumindest mittelfristig auch dem privaten Pkw den bislang geltenden Vorteil der permanenten Verfügbarkeit nehmen könnte (vgl. dazu auch [22], S.64).

Insgesamt bedeutet dies, dass wohl kaum mit größeren Zugangshürden seitens der (potenziellen) Nutzer zu rechnen ist, sofern künftige Mobilitätskonzepte an Praktiken anknüpfen, wie sie bereits heute geübt werden („geübt“ im wahrsten Sinne des Wortes; s. analog dazu die Einübung der Interaktion zwischen Mensch und Computer bei der Fahrzeugnavigation Kap.3). Wenig wahrscheinlich, wenngleich immer wieder auch von wissenschaftlicher Seite ins Feld geführt, erscheint allerdings die Umstellung der kompletten Fahrzeugflotte auf Fahrzeuge, die als Sharing-Fahrzeuge oder als Fahrzeuge von Betreibern öffentlicher Verkehre unterwegs sind. Es gibt derzeit keinerlei Anzeichen dafür, dass der private Pkw an Attraktivität verliert; laut Kraftfahrtbundesamt (KBA) gab es zum 1. Januar 2014 einen neuen Höchststand beim Fahrzeugbestand in Deutschland. Der Pkw-Bestand war zwischen 2013 und 2014 um rund 500.000 Fahrzeuge angewachsen und fügt sich damit in einen längerfristigen Wachstumstrend ein [29].

9.5 Weiterentwicklung der neuen Mobilitätskonzepte durch Automatisierung des Carsharing?

Für die Weiterentwicklung der vorhandenen Carsharing-Konzepte durch autonome Fahrzeuge gibt es eine Reihe von Varianten, die sich analog zu den in Kap. 2 abgebildeten Anwendungsfällen – im Folgenden „Use-Cases“ – verhalten. Diese Varianten zielen auf unterschiedliche Nutzerbedürfnisse ab, die so auch heute schon adressiert werden, allerdings über den Selbstfahrer. Im Folgenden soll entlang der Use-Cases „Autonomes Valet-Parken“, „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“ und „Vehicle-on-Demand“ diskutiert werden, welche Veränderungen Carsharing durch die Einfloftung autonomer Fahrzeuge erfahren würde und welche Wirkungen für den Nutzer sich davon erwarten lassen. Dabei wird auch der Wettbewerb mit derzeit bestehenden Transportangeboten anzusprechen sein.

Bei allen Use-Cases wird der höchste Automatisierungsgrad unterstellt, das ist nach der Nomenklatur der BASt der Automatisierungsgrad „vollautomatisiert“ [30]. Der Unterschied zwischen den Use-Cases liegt in den dafür definierten Anwendungsfällen: Während es beim autonomen Valet-Parken ausschließlich um das Abstellen bzw. Holen des Fahrzeugs geht, bezieht sich der Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer auf grundsätzlich jeden im Straßenverkehr denkbaren Anwendungsfall, wenngleich der Schwerpunkt auf Situationen mit vergleichsweise einfachen Mischverkehren liegt, d. h. auf Verkehren, wie sie beispielsweise auf Autobahnen gegeben sind, wo jedoch auch hohe Geschwindigkeiten die Regel sind. Beim Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer muss der Fahrer die Fahraufgabe dann zeit- und streckenabschnittsweise übernehmen, wenn er Streckenabschnitte durchqueren möchte, die permanent oder temporär von der Freigabe für autonomes Fahren ausgenommen sind. Das Vehicle-on-Demand ist ebenfalls in der Lage, jeden im Straßenverkehr denkbaren Anwendungsfall zu bewältigen, und zwar auch Situationen mit Mischverkehren. Durch den Verzicht auf den sogenannten Fahrerarbeitsplatz, also den Sitzplatz, von dem aus der Fahrer oder die Fahrerin die Fahraufgabe ausführt, sind die Nutzungsmöglichkeiten des Fahrzeuginnenraums deutlich vielfältiger als beim Valet-Parken oder beim Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer.

9.5.1 Autonomes Valet-Parken im Carsharing

Der Use-Case des autonomen Valet-Parkens geht davon aus, dass das Fahrzeug sich selbstständig vom Parkplatz zum Nutzer bzw. vom Nutzer zum Parkplatz bewegen kann, auch unter Verwendung einer öffentlichen Straße.

Der Einsatz von autonomem Valet-Parken im Carsharing würde zunächst bedeuten, dass der Aufwand des Nutzers für die Beschaffung des Fahrzeugs und für die an die Nutzung sich anschließende Parkierung deutlich sinken würde. Vielmehr entstünde nun aus der Sicht des Nutzers ein Tür-zu-Tür-Service – vergleichbar mit einer Taxifahrt, bei der allerdings der Nutzer die Fahraufgabe bei der eigentlichen Fahrt selbst übernimmt. Die für Mobilität aufzuwendende Zeit würde in jedem Fall reduziert, da Zu- und Abgangszeiten entfallen.

Um die Attraktivität des Angebots zu steigern, wären – unabhängig von der Automatisierung – Erweiterungen denkbar in Hinblick auf Wahlmöglichkeiten bei der Ausstattung des Fahrzeugs, der Anzahl der Sitzplätze und der Transportkapazität oder auch Internetverfügbarkeit und Multi-Media-Angebote. Wie stark differenziert die Wahlmöglichkeiten sein könnten, wäre – wie auch beim heutigen Carsharing – abhängig von der Flottengröße, der Anzahl an (potenziellen) Kunden pro Fahrzeug und der Größe des Geschäftsgebietes, aber auch von der Zahlungsbereitschaft der Kunden für unterschiedliche Ausstattungsvarianten. Bei einer großen Flotte wäre es auch denkbar, die Fahrzeugdifferenzierung mit einer preislichen Differenzierung zu hinterlegen, vergleichbar der gängigen Praxis beim stationsbasierten Carsharing oder auch der klassischen Autovermietung. Dem stehen im flexiblen Carsharing derzeit Geschäftsmodelle gegenüber, die für die Nutzer möglicherweise da-

durch einen zusätzlichen (An-)Reiz bieten, dass sie aus der bestehenden Flotte eine große Bandbreite an Fahrzeugen zu den gleichen Kosten bekommen können.

Mit dem autonomen Valet-Parken wird das Bereitstellen von Fahrzeugen an einer Station grundsätzlich überflüssig; das gesamte Carsharing-Angebot ließe sich damit auf flexibles Carsharing umstellen, zumindest würde die Abholung und Rückführung des Fahrzeugs durch den Nutzer überflüssig werden. Zwar werden die Betreiber nicht auf Stationen oder Fahrzeugdepots verzichten, um eine gewisse Zentralisierung und damit Effizienz bei der Wartung der Fahrzeuge zu erzielen. Diese Stationen müssten dann aber nicht mehr in möglichst großer räumlicher Nähe zum Kunden aufgebaut werden, sondern könnten Flächen nutzen, für die geringere Kosten entstehen. Die Distanz zu den Orten der Nutzung ist dabei nicht beliebig, da für den Weg zum Kunden nur ein vergleichsweise enges Zeitfenster zur Verfügung stehen dürfte. Außerdem ist die Anfahrt zum Kunden mit dem Verbrauch von Ressourcen verbunden und stellt gleichzeitig – sofern keine andere Nutzung auf diesem Weg möglich ist – „tote“ Zeit im Fahrzeuggebrauch dar.

Alternativ oder ergänzend dazu könnten mehrere kleinere Sammelpunkte mit einigen wenigen Fahrzeugen relativ dicht verteilt über das Geschäftsgebiet entstehen. Damit würde der Zeitaufwand zwischen Fahrzeugbestellung und Abholung des Nutzers gering gehalten; möglich wäre dann auch eine Mischform der Fahrzeuginanspruchnahme mit wahlweise autonomer Zufahrt oder persönlicher Abholung. Damit ließen sich die aktuell noch sehr unterschiedlichen Zugangszeiten zu den Fahrzeugen, je nach kleinräumiger Dichte der Fahrzeugverfügbarkeit, deutlich nivellieren. Momentan liegen die Zugangszeiten, berechnet aus dem Unterschied zwischen den gemessenen Werten „Buchungszeitpunkt/Reservierung“ und „Fahrtdauer“, zwischen 1–16 Minuten (Beispielsfall Drive-Now mit maximaler Reservierungszeit von 15 Minuten; Quelle: Projekt WiMobil, gefördert vom Bundesumweltministerium BMUB). Die Unterschiede in der durchschnittlichen Dauer der Zugangszeit hängen unmittelbar mit den unterschiedlichen Fahrtzwecken zusammen.

9.5.2 Carsharing unter Einsatz von „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“

Der Use-Case des Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer geht davon aus, dass sich das Fahrzeug grundsätzlich selbstständig auf öffentlichen Straßen bewegen kann, dass aber die Fahraufgabe individuell und zeitweise vom Fahrer oder der Fahrerin wieder übernommen wird.

Aus einer Carsharing-Perspektive bleiben die mit dem „Vollautomaten“ möglichen Veränderungen und Erweiterungen deutlich hinter dem autonomen Valet-Parken zurück, zumindest dann, wenn der Verfügbarkeitsfahrer als Fahrzeuginsasse vorausgesetzt wird. Der einzige Unterschied, der sich in diesem Use-Case zum heutigen Carsharing ergeben würde, wäre die Möglichkeit, während der Fahrt die Fahraufgabe an das Fahrzeug abzugeben, wenn der Fahrer dies wünscht. Manche Streckenabschnitte können für die autonome

Fahrfunktion allerdings auch dauerhaft nicht zugelassen sein, „z. B. Strecken mit einer hohen Fußgängerüberquerfrequenz“ (s. Kap. 2). Dies wären allerdings vor allem Bereiche im städtischen Umfeld, das – zumindest zum jetzigen Zeitpunkt – das Hauptnutzungsgebiet für das flexible Carsharing darstellt.

Die Erweiterung von Carsharing mit Fahrzeugen im Sinne des Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer würde demnach eher auf Strecken am Rand oder außerhalb von Siedlungen einen nachvollziehbaren Nutzen erzeugen. Allerdings lässt sich daraus wohl kaum ein Geschäftsmodell für ein „Carsharing im ländlichen Raum“ ableiten, da durch die Notwendigkeit des Verfügbarkeitsfahrers eine Bedienung des Geschäftsgebietes über ein Fahrzeug, das die Zufahrt und Wegfahrt selbstständig übernimmt, nicht möglich ist.

Insgesamt ist der Einsatz des Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer den Möglichkeiten, die sich durch autonomes Valet-Parken ergeben würden, deutlich unterlegen.

9.5.3 Das Carsharing-Fahrzeug als Vehicle-on-Demand

Der Use-Case des Vehicle-on-Demand geht davon aus, dass sich das Fahrzeug selbstständig auf allen öffentlichen Straßen bewegt. Ein Fahrer ist – auch als Rückfallebene – nicht notwendig. Damit wird auch kein Fahrerarbeitsplatz mehr benötigt, was neue Gestaltungsmöglichkeiten für den Innenraum des Fahrzeugs eröffnet.

Als Carsharing-Fahrzeug verfügt das Vehicle-on-Demand zunächst über die gleichen Vorteile wie das Carsharing-Fahrzeug mit der Funktion des Valet-Parkens, allerdings wird aus dem Fahrzeug zusätzlich eine Art „auf der Straße rollendes Abteil“. Damit sind in diesem Fahrzeug ganz unterschiedliche Beschäftigungen möglich, wie z. B. das Lesen, Spielen, Telefonieren, Arbeiten oder Dösen, und der Nutzer kann dazu jeden beliebigen Platz im Fahrzeug einnehmen. Unterstellt man Nutzungsdauern, wie sie heute im flexiblen Carsharing üblich sind, erscheint es jedoch offen, ob der Zusatznutzen, der durch den Wegfall der Fahraufgabe entsteht, tatsächlich hoch bewertet wird – so liegt beispielsweise die durchschnittliche Nutzungsdauer eines Fahrzeugs in einer Flotte wie der von DriveNow im Jahr 2014 bei rund einer halben Stunde [31]. Geht man davon aus, dass autonom fahrende Carsharing-Fahrzeuge für alle im Laufe eines Tages anfallenden Arbeitswege genutzt werden, würde diese Zeitspanne in den größeren Städten nach heutigem Stand durchschnittlich 54 Minuten ausmachen, für Menschen, die im Umland der größeren Städte oder im ländlichen Raum wohnen, beträgt der Gesamtaufwand für Arbeitswege während eines Werktages derzeit 50 bzw. 49 Minuten (Datenquelle: MiD 2008, [1]). Dabei gibt es nahezu keinen Unterschied hinsichtlich der Zeitaufwände, die in den verschiedenen Raumtypen für Arbeitswege mit dem Auto aufgewendet werden (s. Abb. 9.2).

Die Fahrt in einem Vehicle-on-Demand im Carsharing würde einer Fahrt mit dem Taxi ähneln, und da das Fahrzeug einem breiten Nutzerkreis zur Verfügung steht, höchstwahrscheinlich auch Taxifahrten ersetzen. Dies wird jedoch in Abhängigkeit von den Kosten zu sehen sein, die für eine Fahrt mit einem autonomen Carsharing-Fahrzeug im Vergleich zum Taxi entstehen.

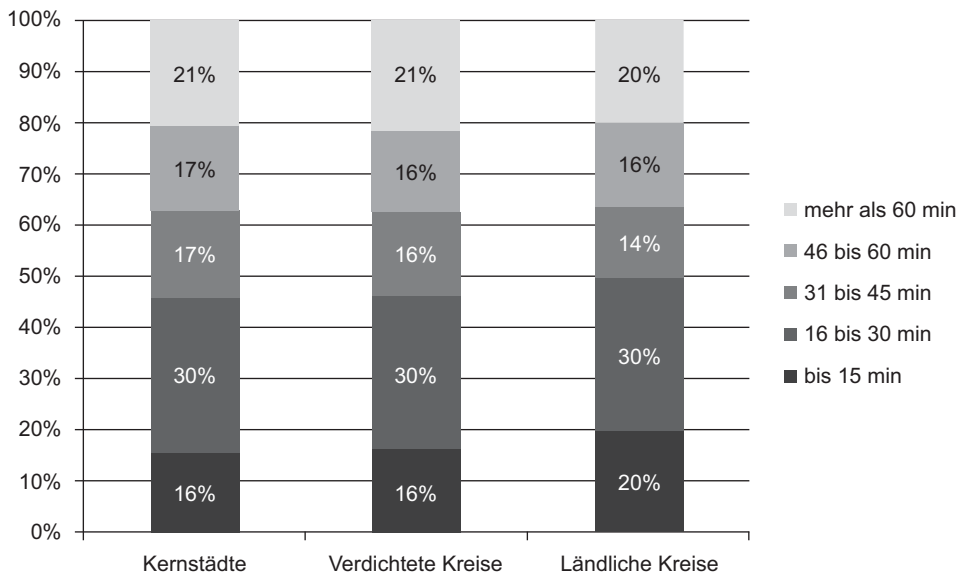


Abb. 9.2 Unterwegszeit für Arbeitswege nach Kreistypen (Datenquelle: [1])

9.5.4 Zwischenfazit

Vergleicht man verschiedene Varianten des Einsatzes autonomer Fahrzeuge im Carsharing, ist auf Seiten der Fahrzeugnutzer der Zugewinn an Komfort durch die Automatisierung der Fahraufgabe nicht grundsätzlich anders als beim privaten Fahrzeug. Auch im Fall von Carsharing wird die Fahrzeit frei für Beschäftigungen, die sich während der Fahrt mit einem autonomen Fahrzeug durchführen lassen. Der für das Carsharing wahrscheinlich entscheidende neuartige Nutzen entstünde bei der Zuführung des Fahrzeugs zum Nutzer und dem Entfernen des Fahrzeugs nach Abschluss des Nutzungsvorgangs.

Der Perspektive der Nutzer steht die der Betreiber gegenüber, die mit der Automatisierung des Zu- und Wegführens eine erhöhte Nutzungsfrequenz und Gesamtnutzungsdauer des einzelnen Fahrzeugs realisieren und damit die Rentabilität des Carsharing erhöhen könnten. Damit würden Unterschiede in der Nutzungsfrequenz, wie sie in Untersuchungen zum flexiblen Carsharing offenkundig werden, zumindest nivelliert. Derzeit steht die Nutzungsfrequenz in direktem Zusammenhang mit dem Standort, an dem das Fahrzeug verlassen wird. Hotspots in Innenstadtbereichen stehen Gebiete gegenüber, an denen die meisten dort abgestellten Fahrzeuge mehrere Stunden ungenutzt stehen (s. Abb. 9.3). Als durchschnittliche Nutzungsdauer geben Betreiber derzeit zwischen 62 und 78 Minuten pro Fahrzeug und Tag an [32]; damit ist das noch offene Potenzial einer zusätzlichen Auslastung der Fahrzeuge beträchtlich.

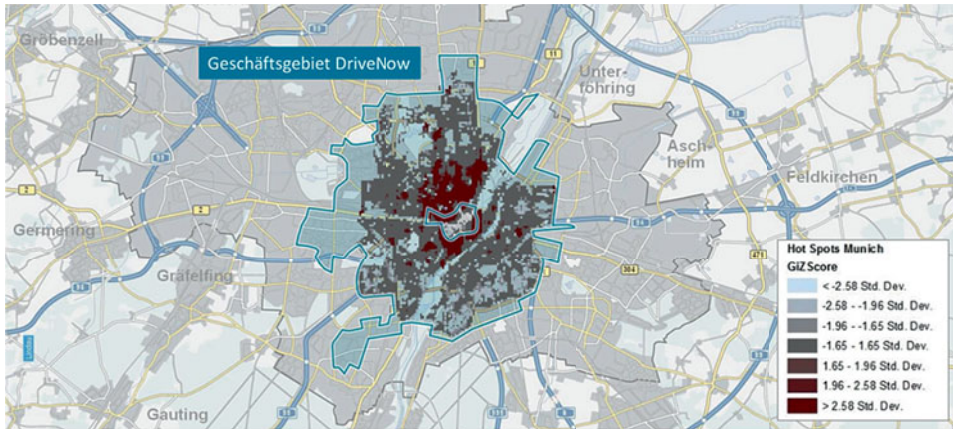


Abb. 9.3 Buchungintensität von Fahrzeugen im flexiblen Carsharing – das Beispiel DriveNow München [14], S. 18

GIZ-Score: Ein hoher positiver Wert bedeutet, dass es in dem betreffenden Gebiet zu einer hohen Anzahl von Buchungen kommt (je höher der Wert, desto mehr Buchungen), ein niedriger Wert bedeutet, dass es nur eine geringe Anzahl von Buchungen gibt (je geringer der Wert, desto weniger Buchungen).

9.6 Neue Mobilitätskonzepte jenseits von Carsharing: Hybridisierung des öffentlichen Verkehrs?

Während das Carsharing, insbesondere in seiner neuen Variante als flexibles Carsharing, besondere Aufmerksamkeit erfährt, auch im Zusammenhang mit der Automatisierung der Fahrzeuge, wird oft übersehen, dass sich auch für den öffentlichen Verkehr mit der Automatisierung neue Optionen für eine (weitere) Ausdifferenzierung des derzeitigen Angebots ergeben und damit weitere Formen neuer Mobilitätskonzepte entstehen könnten. Dabei ist es unverzichtbar, auch die jeweiligen raumspezifischen Bedingungen zu berücksichtigen.

Die im Zusammenhang mit dem öffentlichen Verkehr zu diskutierenden, grundsätzlich vorhandenen Optionen betreffen

- die Neugestaltung von Intermodalität und Flexibilisierung des öffentlichen Verkehrs,
- die Individualisierung des öffentlichen Verkehrs,
- die Verdichtung der Bedienungsmöglichkeiten mit öffentlichem Verkehr.

Der besondere Vorteil, der hierbei aus dem Einsatz von autonomen Fahrzeugen entstehen würde, beträfe die bedarfsangepasste Bedienung: Fixe Routenpläne könnten durch flexible Bedienung ergänzt werden. Die zusätzlichen Routen könnten nach den Anforderungen durch die Kunden optimiert werden. Fixe Abfahrtszeiten würden durch zeit-

lich optimierte Routenverläufe – entsprechend den Anforderungen seitens der Kunden – ersetzt.

Diese Individualisierung des öffentlichen Verkehrs kommt spätestens dann einer „Hybridisierung“ gleich, wenn jenseits der Flexibilisierung von Zeiten und Routen auch Auswahlmöglichkeiten hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge angeboten werden. Grundsätzlich ist die Überlegung, den öffentlichen Verkehr über das fahrzeugspezifische Angebot zu differenzieren, nicht neu. Allerdings hat sich dies aufgrund der Kosten, die beim Vorhalten unterschiedlicher Flotten mit entsprechendem Personal entstehen, bisher nur in sehr engen, meist touristischen Nischen durchsetzen können (z. B. das Cable Car in San Francisco, der Glacier Express in der Schweiz oder der Blue Train in Südafrika).

9.6.1 Neugestaltung von Intermodalität und Flexibilisierung des öffentlichen Verkehrs

Intermodalität wird definiert als der Wechsel zwischen unterschiedlichen Verkehrsmitteln im Verlauf eines Weges [33]. Folgt man dieser Definition, dann gibt es – zumindest in Deutschland – intermodales Verhalten in einem nur ganz geringen Umfang. Laut der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ trifft dies nur auf 1,3 Prozent aller Alltagswege zu [1]. Nicht berücksichtigt ist dabei allerdings das erhebliche Maß an Intermodalität innerhalb des öffentlichen Verkehrs, insbesondere in der Verknüpfung von Hauptstrecken mit Zu- bzw. Abgangsstrecken. Typisches Beispiel hierfür ist der Zugang zu S-Bahnen oder Regionalbahnen über eine Buslinie, wie er vor allem in suburbanen und ländlichen Gebieten besteht. In großen Städten ist die Intermodalität zwischen den unterschiedlichen Verkehrsmitteln S-Bahn, U-Bahn, Straßenbahn und Bus angesichts der Überlagerung der Netze der einzelnen Verkehrsmittel noch deutlich stärker ausgeprägt. Im Folgenden wird vor allem die Situation in städtischen Randgebieten und weniger dicht besiedelten (ländlichen) Räumen reflektiert. Vergleichbare Szenarien für die Stadt diskutiert Heinrichs in diesem Band (s. Kap. 11).

Die Neugestaltung von Intermodalität durch die Nutzung autonomer Fahrzeuge könnte analog zum derzeit bestehenden System über den privaten Pkw oder aber ein öffentliches System stattfinden. Im Alltagsverkehr würde die Durchführung des Zu- und Abgangs für die Hauptstrecke mit dem privaten Pkw in etwa dem entsprechen, was heute als *Kiss-and-Ride* bezeichnet wird: Eine Person bringt eine andere mit dem Pkw zum Verkehrsmittel der Hauptstrecke, verabschiedet sich und nimmt dann den Pkw wieder mit, um ihn (in der Regel tagsüber) während der Abwesenheit des oder der anderen nutzen zu können. Mit einem autonomen Fahrzeug entfielen diese Notwendigkeit des „Fahrdienstes“, zumindest dann, wenn kein Verfügbarkeitsfahrer im Fahrzeug anwesend sein muss. Das Muster des *Kiss-and-Ride* findet sich in ähnlicher Form auch beim Fernverkehr wieder, wo übrigens heute schon Carsharing-Betreiber wie DriveNow begonnen haben, ein spezielles Angebot für den Zu- bzw. Abgang zu Flughäfen, Bahnhöfen oder Fernbus-Bahnhöfen einzurichten – beispielsweise mit reservierten Parkplätzen am Flughafen oder durch die Gewährung vergünstigter Tarife bei intermodaler Nutzung von Fernbus und Carsharing-Fahrzeug [34].

Wird der Zu- und Abgang für die Hauptstrecke mit einem öffentlichen System durchgeführt, gäbe es mittels des autonomen Fahrzeugs die Möglichkeit, wesentlich gezielter auf die Nutzerbedürfnisse einzugehen. Die festen Routen und Abfahrtszeiten könnten entfallen; vielmehr könnten Abholzeiten und Abholorte individuell vereinbart werden. Wahrscheinlich würde eine größere Flotte kleiner und mittlerer Fahrzeuge für den Zu- und Abgang eingesetzt; das kleinräumige System des öffentlichen Verkehrs würde zu einem System mit einer Vielzahl von Sammeltaxis mit angepasster Kapazität. Trotz Automatisierung bliebe die logistische Herausforderung enorm. Dazu kommt als wesentliche Voraussetzung für ein Funktionieren des Systems, dass die Nutzer die Vereinbarungen mit dem Betreiber mit hoher Zuverlässigkeit einhalten. Dies gälte insbesondere hinsichtlich der Abfahrtszeiten, zumal dann, wenn auf den Hauptstrecken weiterhin von einem festen Fahrplan oder doch zumindest einer Taktung auszugehen ist.

Eine solche Umgestaltung des Systems könnte auch Überlegungen zur Finanzierung der Grundversorgung mit öffentlichem Verkehr neu beleben – einerseits in Richtung eines *Pay-as-you-drive*, aber auch in Richtung eines pauschalisierten, über Steuern oder Abgaben pro Kopf finanzierten Angebots an alle Einwohner, wie es für Städte immer wieder diskutiert wird. Eine hohe Bediendichte auch in suburbanen und sogar ländlichen Räumen würde eine flächendeckende Pauschalabgabe rechtfertigen und könnte dabei eine Maßnahme sein, mit der die Nutzung des privaten Pkw reduziert werden kann.

9.6.2 Individualisierung des öffentlichen Verkehrs

Die Individualisierung des öffentlichen Verkehrs durch autonome Fahrzeuge könnte dann über die Aufhebung von im Fahrplan festgelegten Abfahrtszeiten und Routen hinausgehen, wenn es tatsächlich zu einer Reduzierung der Fahrzeuggrößen – zumindest in bestimmten Teilen des Bediengebietes – kommen würde. Damit würde sich die Möglichkeit eröffnen, den Nutzern unterschiedliche Fahrzeugtypen und Fahrzeugausstattungen anzubieten, was derzeit in einer eher rudimentären Form mit dem Angebot von 1. und 2. Klasse im öffentlichen Verkehr erfolgt, jedoch nur im Schienenverkehr tatsächlich umgesetzt ist.

Als ein möglicher Einstieg in eine solche Individualisierung des öffentlichen Verkehrs lassen sich Werksbusse interpretieren, als neueres Beispiel sei hier der mit WLAN-Zugang ausgestattete Google-Bus in und um San Francisco genannt, der Arbeitnehmer der Firma zu ihrer Arbeitsstätte bringt. In diesem Fall trifft sich eine spezifische Community in einem gemeinsamen Shuttle. Vergleichbare Konzepte, wenn auch in einer Vielfalt an weiteren Spielarten, sind denkbar und erscheinen auf der Basis autonom fahrender Fahrzeuge besonders attraktiv.

Parallel dazu ist – auch aus privater Initiative heraus – die Entwicklung neuer Car Pooling-Konzepte denkbar, die einen Mix aus Gemeinschaftsbesitz und gemeinschaftlicher, aber zeitweise auch individueller Nutzung eines Fahrzeugs darstellen könnten. Heute beschränkt sich das Car Pooling im Wesentlichen auf die mittelfristig geplante oder relativ kurzfristige Bildung von Mitfahrgemeinschaften, bei denen das Fahrzeug vom

Eigentümer bereitgestellt wird, der gleichzeitig Fahrer ist. Auch neuere Dienste wie Uber (www.uber.com) oder Lyft (www.lyft.com) weichen von diesem Prinzip nicht ab, sie bieten aber Taxi-ähnliche Dienste an und sind somit mit den klassischen Fahrgemeinschaften, die im Alltagsverkehr überwiegend aus einer festen Gruppe an Personen bestehen, nicht zu vergleichen. Die Vermutung liegt nahe, dass mit der Einführung von autonomen Fahrzeugen diese Mitfahrdienste obsolet werden und sich hin zu Peer-to-Peer Carsharing entwickeln.

9.6.3 Verdichtung der Bedienungsmöglichkeiten mit öffentlichem Verkehr

In Verbindung mit dem Thema Intermodalität sind die Möglichkeiten einer dichteren Bedienung im öffentlichen Verkehr, auch in der Fläche, bereits weiter oben angesprochen worden (für den städtischen Raum s. Kap. 11). Diese aus dem Einsatz von autonomen Fahrzeugen resultierenden Vorteile gelten sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht, d. h. sowohl für Räume an der Peripherie als auch für Randzeiten. Allerdings gilt auch hier – selbst unter Beachtung der Tatsache, dass Personalkosten für den Fahrer entfallen – eine wirtschaftliche Untergrenze, die sich aus der Nutzungsfrequenz ergibt. Das heißt auch, dass eine räumlich stark streuende Nutzung nur bis zu einem gewissen Umfang durch das Vorhalten einer größeren Flotte aufgefangen werden kann. In jedem Fall müssen sich auch die Investitions- und Betriebskosten für diese Fahrzeuge amortisieren.

9.7 Implementierung von neuen Mobilitätskonzepten mit autonomen Fahrzeugen

Carsharing erregt derzeit nicht nur Aufsehen, weil neue Formen entwickelt werden, seine Sichtbarkeit deutlich zunimmt und die Zahl der Carsharing-Nutzer in den letzten beiden Jahren sprunghaft angewachsen ist, sondern auch, weil sich abzuzeichnen scheint, dass Carsharing, das in seiner kommerziellen oder von Vereinen getragenen Variante vom privaten Autobesitz unabhängig ist, ein geeignetes Vehikel werden könnte, um neue Fahrzeugtechnologien in den Markt einzuführen. Die Nutzer erhalten entsprechende Fahrzeuge über die Flotte ihres Anbieters und können sie – ohne Aufpreis gegenüber den herkömmlichen Fahrzeugen – ausprobieren. Tatsächlich geschieht dies derzeit im Umfeld von Elektromobilität, wo Unternehmen wie DriveNow und Car2Go, aber auch Citroën mit dem Multicity-Auto, Elektrofahrzeuge in ihre Carsharing-Flotte eingliedern. Seitens der Nutzer wird dies ausgesprochen positiv aufgenommen. Dazu berichten Projekte zum elektromobilen Carsharing zweierlei: Zum einen gelingt es, die neue Technologie zügig für einen großen Teil der Carsharing-Nutzer bereitzustellen und damit auch ihre Nutzung zu initiieren. Zum anderen suchen viele Nutzer auch ganz gezielt die über das Carsharing gegebene Möglichkeit, die neue Technologie zu testen und zu nutzen ([13], S.15; [15], S.19).

Schwieriger könnte die Einführung von autonomen Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr werden, wenngleich die bisherigen Erfahrungen mit selbstfahrenden Schienenfahrzeugen derzeit weitestgehend positiv ausfallen, so z. B. bei der Pariser Metro-Linie 1, die seit 2012 vollautomatisiert ist [36], oder auch im Fall der Nürnberger U-Bahn zum Flughafen [37]. Allerdings gelten angesichts der räumlichen Abgrenzung des Bahnkörpers hier andere Bedingungen, als dies aller Voraussicht nach im Straßenverkehr der Fall wäre. Würde auch im Straßenverkehr das autonome Fahrzeug an eine feste Infrastruktur gebunden, würden daraus nicht nur erhebliche Kosten entstehen, sondern auch die Möglichkeiten zur Flexibilisierung von Routenführungen entfallen. Besonders wichtig erscheint deshalb der testweise Einsatz von autonomen Fahrzeugen in festgelegten, kleineren öffentlichen oder halböffentlichen Bereichen, wie er in Kap. 10 beschrieben wird. Eine vergleichbar offene „Experimentier-Philosophie“ lässt sich derzeit in Deutschland nicht feststellen.

9.8 Fazit

Die Weiterentwicklung von Carsharing-Systemen und die Veränderung des öffentlichen Verkehrs durch den Einsatz von autonomen Fahrzeugen erscheinen grundsätzlich möglich und an vielen Stellen auch mit einem eindeutig definierbaren Nutzen für die Verkehrsteilnehmer verbunden. Im Carsharing scheint der Einsatz eines vollautomatisierten Bring- und Hol-Dienstes im Sinne von Valet-Parken fast eine logische und notwendige Konsequenz zu sein, wenn mittelfristig Verfügbarkeit und Nutzung von Carsharing noch stärker in die Fläche gehen sollen.

Daneben ist heute schon absehbar, dass rund um Carsharing und Mitfahrdienste zahlreiche neue Ideen entstehen und ausgetestet werden, die in Verbindung mit einem autonomen Fahrzeug ein noch deutlich größeres Potenzial entwickeln könnten. So werden Mitfahrdienste entwickelt, die zusätzlich Betreuungsscharakter besitzen, nicht nur für ältere Menschen, sondern auch für Kinder – wie dies derzeit Boost by Mercedes-Benz in Palo Alto (Kalifornien) vormacht. Auch hier zeigt sich die unmittelbare Verknüpfung von Mobilität und Informations- und Kommunikationstechnologien als Grundlage für die Organisation des Dienstes [38].

Völlig offen ist momentan die Frage der Kosten bzw. der Rentabilität; möglicherweise sollte diese Frage im Zusammenhang mit der Finanzierung des Systems gestellt werden. Auf Seiten der Nutzer muss sich ebenfalls erst noch zeigen, ob und inwieweit das *Pay-as-you-drive* über das Carsharing hinaus Akzeptanz findet. Auch an dieser Stelle wird erst experimentiert. So setzt beispielsweise Spotcar in seiner aktuellen Version der zeitabhängigen Abrechnung von Anbietern wie Car2Go und DriveNow eine kilometerabhängige Preisberechnung entgegen, um damit keine unmittelbare Kostenbelastung der Kunden für staubedingte Verzögerungen im städtischen Verkehr herbeizuführen. Im öffentlichen Verkehr beginnt derzeit erst die *Pay-as-you-Drive*-Ära mit Systemen wie Touch&Travel. Möglicherweise jedoch sind die Bezahlssysteme im Carsharing und vergleichbare Systeme im öffentlichen Verkehr Wegbereiter für den Einstieg in ein hoch flexibles System.

Literatur

1. infas, DLR Alltagsverkehr in Deutschland. Struktur – Aufkommen – Emissionen –Trends. Abschlussbericht zum Projekt „Mobilität in Deutschland 2008“. Bonn und Berlin (2010)
2. Nobis, C. Multimodale Vielfalt. Quantitative Analyse multimodalen Verkehrshandelns. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin (2014)
3. Beckmann, Klaus; Klein-Hitpaß, Anne (Hrsg.): Nicht weniger unterwegs, sondern intelligenter? Neue Mobilitätskonzepte. Edition difu Berlin (2013)
4. Spiegel Online: Carsharing mit selbst fahrenden Autos: Daimler eifert Google nach. erstmals veröffentlicht am 15. Juli 2014. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/daimler-autobauer-plant-car-sharing-mit-autonom-fahrenden-smarts-a-980962.html>; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
5. BCS (Bundesverband CarSharing): Datenblatt CarSharing in Deutschland Stand 01.01.2014. http://www.carsharing.de/sites/default/files/uploads/presse/pdf/datenblatt_carsharing_in_deutschland_stand_01.01.2014.pdf; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
6. BCS (Bundesverband CarSharing): <http://www.carsharing.de/presse/pressemitteilungen/carsharing-boom-haelt-an>; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
7. Breindl, K. CarSharing ist auch in kleinen Städten möglich. In: Bundesverband CarSharing e.V. (Hrsg.): Eine Idee setzt sich durch. 25 Jahre CarSharing. Brühl (köln stad- und verkehrsverlag) S.67–76. (2014)
8. Wirtschaftswoche Online: BMW, Daimler und Bahn erwägen Carsharing-Allianz. erstmals veröffentlicht am 5. Mai 2012. <http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/mobilitaet-bmw-daimler-und-bahn-erwaegen-carsharing-allianz/6591352.html>; Zugriff am 4. September 2014. (2012)
9. Deutsche Bahn AG. 215.000 Kunden entscheiden sich für „Flinkster- Mein Carsharing“. Press information, January 2013. http://www.diebahn-online.eu/de/presse/presseinformationen/pi_it/3216552/ubd20130124.html?start=50&itemsPerPage=20. Zugriff am 4. September 2014
10. Hampshire, R.; Gaites, C.: Peer-to-Peer Carsharing – Market analysis and potential growth. 90th TRB Annual Meeting, 23–27 January 2011, Washington D.C. (2011)
11. Gossen, M.: Nutzen statt Besitzen – Motive und Potenziale der internetgestützten gemeinsamen Nutzung am Beispiel des Peer-to-Peer Car-Sharing. Schriftenreihe des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) 202/12. (2012)
12. Loose, W. Wie alles anfang – CarSharing als Reaktion auf die Verkehrs- und Umweltsituation in den 90er Jahren. In: Bundesverband CarSharing e.V. (Hrsg.): Eine Idee setzt sich durch. 25 Jahre CarSharing. Brühl (köln stad- und verkehrsverlag) S.11–16. (2014)
13. Loose, W., Nobis, C.; Holm, B.; Bake, D.: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Verkehrstechnik, No.114. (2004)
14. DLR Institut für Verkehrsforschung, BMW, Bundeswehr-Universität München, Deutsche Bahn (2014): Wirkung von E-Car-Sharing-Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen. Halbzeitkonferenz, Berlin, 3. Juli 2014. (2014)
15. Öko-Institut; Institut für sozialökologische Forschung (2014): SHARE – Forschung zum neuen Carsharing. Wissenschaftliche Begleitforschung zu Car2Go. Halbzeitkonferenz, Berlin, 3. Juli 2014. (2014)
16. Lichtenberg, J.; Hanel, F.: Carsharing und ÖPNV – Nutzen für beide? Eine Analyse der Situation in Frankfurt am Main. In: Der Nahverkehr H.11/2007, S.37–41. (2007)
17. Ackermann, T.; Loose, W.; Reining, C.: Die Verknüpfung von CarSharing und ÖPNV. In: Bundesverband CarSharing e.V. (Hrsg.): Eine Idee setzt sich durch. 25 Jahre CarSharing. Brühl (köln stad- und verkehrsverlag) S.111–122. (2014)
18. Scholl, G.; Hirschl, B.; Tibitanzl, F.: Produkte länger und intensiver nutzen. Zur Systematisierung und ökologischen Beurteilung alternativer Nutzungskonzepte. Schriftenreihe des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) 134/98. (1998)

19. Canzler, W. Der Öffentliche Verkehr im postfossilen Zeitalter: Sechs Thesen. In: Schwedes, O. (Hrsg.): Öffentliche Mobilität. Berlin, S.229–240. (2014)
20. Benkler, Y.: Sharing nicely: On shareable goods and the emergence of sharing as a modality of economic production. <http://christmasgorilla.net/longform/benkler-sharing-nicely.html>; Zugriff am 4. September 2014. (ohne Jahr)
21. Scholl, G.; Schulz, L.; Süßbauer, E.; Otto, S. Nutzen statt Besitzen – Perspektiven für ressourceneffizienten Konsum durch innovative Dienstleistungen. Ressourceneffizienz Paper 12.4, Berlin. (2010)
22. Einert, D.; Schrader, U.: Die Bedeutung des Eigentums für eine Ökologisierung des Konsums. Lehrstuhl Markt und Konsum, Forschungsbericht Nr. 36, Universität Hannover. (1996)
23. Heinrichs, H.; Grunenberg, H.: Sharing Economy – Auf dem Weg in eine neue Konsumkultur? Lüneburg, Centre for Sustainability Management. (2012)
24. Bardhi, F.; Eckhardt, G. M.: Access-based consumption: The case of Carsharing. *Journal of Consumer Research*, Vol. 39, S.881–898. (2012)
25. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e.V. (BITKOM): Smartphone-Boom setzt sich 2014 ungebrochen fort. erstmals veröffentlicht am 12. Februar 2014 http://www.bitkom.org/de/presse/8477_78640.aspx; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
26. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e.V. (BITKOM): Jeder zweite Smartphone-Besitzer installiert zusätzliche Apps. erstmals veröffentlicht am 17. Januar 2014 http://www.bitkom.org/de/presse/8477_78640.aspx; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
27. ARD-ZDF-Onlinestudie 2013. http://www.ard-zdf-onlinestudie.de/index.php?id=419_2013
28. ARD-ZDF-Onlinestudie 2013. http://www.ard-zdf-onlinestudie.de/index.php?id=392_2013
29. Kraftfahrtbundesamt. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html; und http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/2013/2013_b_ueberblick_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3. (2014)
30. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Forschung kompakt 11/12. (2012)
31. Müller, J.; Schmöller, S.; Bogenberger, K.: Empirische Datenanalyse von Free Floating Car Sharing-Systemen, HEUREKA 2014, pp. 577–590. (2014)
32. Entwicklung des CarSharings in Deutschland: DriveNow und Car2Go haben die Nase vorn. <http://getmobility.de/20140816-drivenow-und-car2go-haben-die-nase-vorn/>; erstmals veröffentlicht am 16. August 2014; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
33. Chlond, B.; Manz, W.: INVERMO – Das Mobilitätspanel für den Fernverkehr. Arbeitsbericht IfV-Report Nr.00-9, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe. (2000)
34. CarsharingNews.de: MeinFernbus und DriveNow kooperieren. <http://www.carsharing-news.de/meinfernbus-drivenow-kooperation/> erstmals veröffentlicht am 6. Juni 2014; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
35. Mein Fernbus und DriveNow kooperieren. <http://www.carsharing-news.de/meinfernbus-drivenow-kooperation/> vom 6. Juni 2014; Zugriff am 13.08.2014. (2014)
36. Spiegel Online: Älteste U-Bahn-Strecke von Paris: Métro-Linie 1 fährt ohne Zugführer. <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/aeltteste-u-bahnstrecke-von-paris-metro-linie-1-fahrt-ohne-zugfuhrer-a-795718.html>; erstmals veröffentlicht am 3. November 2011; Zugriff am 17. August 2014. (2011)
37. Youtube: Fahrt in der führerlosen U-Bahn in Nürnberg. <https://www.youtube.com/watch?v=uPPpIGesPTY>; erstmals veröffentlicht am 10. Dezember 2012; Zugriff am 4. September 2014. (2012)
38. Boostbybenz. <https://boostbybenz.com/>; Zugriff am 4. September 2014. (2014)

Sven A. Beiker

Inhaltsverzeichnis

10.1 Einleitung 198

10.2 Begriffsbestimmung und Abgrenzung 198

10.3 Entwicklungstrends im automatisierten Fahren 199

 10.3.1 Kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrerassistenz:
 evolutionäres Szenario 199

 10.3.2 Umgestaltung der Individualmobilität:
 revolutionäres Szenario 202

 10.3.3 Zusammenwachsen von Individualmobilität und öffentlichem Personentransport:
 transformatives Szenario 204

10.4 Vergleichende Betrachtung der Szenarien 206

 10.4.1 Systemischer Vergleich 206

 10.4.2 Technischer Vergleich 209

 10.4.3 Regulatorischer Vergleich 210

 10.4.4 Unternehmensstrategischer Vergleich 211

10.5 Zusammenfassung und Ausblick 213

 Literatur 214

S. A. Beiker (✉)
formerly Stanford University, Center for Automotive Research at Stanford, USA
sven@svenbeiker.com

10.1 Einleitung

Nach wie vor gehören Verkehrsunfälle zum alltäglichen Straßenbild, und die Statistiken dokumentieren, dass es beispielsweise in den USA ca. 33.000 Todesopfer pro Jahr gibt [1]; in Deutschland sterben ca. 3300 Menschen pro Jahr im Straßenverkehr [2]. An dieser Stelle verspricht die Fahrzeugautomatisierung, d. h. die zunehmende Übergabe der Fahraufgabe vom Menschen an den Computer, eine deutliche Reduktion der Unfallzahlen und Unfallschwere. Darüber hinaus ermöglichen automatisierte Fahrzeuge auch eine bessere Koordination der individuell genutzten Fahrzeuge allgemein und damit eine effizientere, komfortablere und sicherere Individualmobilität.

Dabei hat die Forschung und Entwicklung an automatisierten Fernstraßen und Fahrzeugen bereits eine über 50-jährige Historie, und es stellt sich die Frage, inwieweit die Vision realistisch ist, dass der Mensch in naher Zukunft die Fahraufgabe vollständig an den Computer übergeben kann. Dazu sind derzeit verschiedene Entwicklungsrichtungen zu erkennen: Die etablierte Automobilindustrie arbeitet an der Weiterentwicklung sogenannter Fahrerassistenzsysteme hin zum automatisierten Fahren; automobilfremde Technologiefirmen in der IT-Branche begreifen das automatisierte Fahren als ein neues Geschäftsfeld für ihre Kernprodukte; Firmenneugründungen drängen mit Hochtechnologie in den Bereich der automatisierten Individualmobilität. Bei tieferer Betrachtung wird deutlich, dass die genannten Akteure unterschiedliche Stärken und Produktziele haben, letztlich aber doch von derselben Motivation getrieben sind, nämlich die Individualmobilität sicherer, effizienter und komfortabler zu gestalten. Der Vergleich dieser Entwicklungsrichtungen und deren Akteure soll Inhalt dieses Beitrags sein.

Der Vergleich dieser Entwicklungsrichtungen wird als Einführungsszenarien betrachtet, was eine Prognose dessen ist, wie sich die Einführung höhergradig automatisierter Fahrzeuge vollziehen könnte. Dabei handelt es sich vorwiegend um eine Extrapolation des öffentlich bekannten Entwicklungsstandes automatisierter Fahrzeuge, fortgedacht unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen aus Infrastruktur, Wirtschaft und Technik.

10.2 Begriffsbestimmung und Abgrenzung

Automatisierte Fahrzeuge oder, wie sie auch genannt werden, „autonome“, „fahrerlose“, „selbstfahrende“ Fahrzeuge, werden derzeit weitverbreitet in der Öffentlichkeit diskutiert, in Universitäten beforscht und in der Automobilindustrie entwickelt. In diesem Beitrag richtet sich der Blick auf Straßenfahrzeuge, mit einem besonderen Schwerpunkt auf Pkw und gegebenenfalls auch Lkw. Schienengebundene oder Luft- bzw. Wasserfahrzeuge werden nicht darunter verstanden.

Im Allgemeinen werden diese Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr betrieben, zur Diskussion von Synergieeffekten werden allerdings auch Fahrzeuge in abgeschlossenen Bereichen betrachtet, wie z. B. auf Firmengeländen oder auch in Freizeitparks und Fußgängerzonen. Im Unterschied zum Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr sind Einsatz-

beispiele in diesen abgegrenzten bzw. halböffentlichen Bereichen von Interesse, da dort bereits einige wichtige Interaktionen automatisierter Fahrzeuge mit der Öffentlichkeit beobachtet werden können, was letztlich dem Einsatz im allgemeinen Straßenverkehr zugutekommen wird. Das wird im Detail später in den einzelnen Einsatzszenarien diskutiert werden.

Bezüglich der Begrifflichkeit zum automatisierten Fahren bzw. automatisierter Fahrzeuge wird in diesem Beitrag die Definition der SAE International J3016 [3] benutzt, d. h., es wird nach assistiert, teilautomatisiert, bedingt automatisiert, hochautomatisiert sowie vollautomatisiert unterschieden.

Für diesen Beitrag wird aufgrund des speziellen Betrachtungsschwerpunkts der Begriff des höhergradig automatisierten Fahrens eingeführt; dies umfasst das bedingt-, hoch- oder vollautomatisierte Fahren. Dieser Schwerpunkt wird gesetzt, da der Schritt über das teilautomatisierte Szenario hinaus, d. h. wenn der Fahrer das Fahrzeug bzw. das System nicht mehr laufend überwachen muss, zu einer grundsätzlichen Veränderung des Autofahrens führt. Diese besteht darin, dass der Fahrer während der Fahrt anderen Aufgaben als der eigentlichen Fahrzeugführung nachgehen kann, später sogar im Falle „fahrerloser“ Fahrzeuge gar nicht mehr erforderlich ist. Damit werden für die Individualmobilität auch vollkommen neue Betriebs- und Geschäftsmodelle möglich.

10.3 Entwicklungstrends im automatisierten Fahren

Die Beweggründe für die Einführung des automatisierten Fahrens – Sicherheit, Effizienz, erweiterte Mobilität, Komfort – lassen sich bei verschiedenen Entwicklungstrends auf diesem Gebiet beobachten. Dabei sind die einzelnen Aspekte unterschiedlich stark ausgeprägt und hängen deutlich vom verfolgten Einsatzgebiet und -zweck ab. Das wird in den folgenden Abschnitten anhand von derzeit zu beobachtenden Entwicklungstrends genauer ausgeführt. Dazu beschreiben die folgenden drei Unterabschnitte zunächst die Einführungsszenarien, welche die derzeitige Diskussion in der Fachwelt und auch der breiten Öffentlichkeit widerspiegeln.

10.3.1 Kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrerassistenz: evolutionäres Szenario

Einer der Hauptakteure des automatisierten Fahrens ist die Automobilindustrie mit ihren Fahrzeugherstellern und Systemlieferanten. Dabei handelt es sich um die Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen, d. h. von Konzepten, die den Fahrer bei der Fahrzeugführung unterstützen. In den vergangenen fast 40 Jahren haben sich derartige Systeme wie Anti-Blockier System (ABS), Electronic Stability Program (ESP), Adaptive Cruise Control (ACC) oder Spurhalteassistenten in Pkw und Lkw etabliert, die den Fahrer zunächst bei der Längs- und zunehmend auch bei der Querverführung des Fahrzeugs unterstützen.

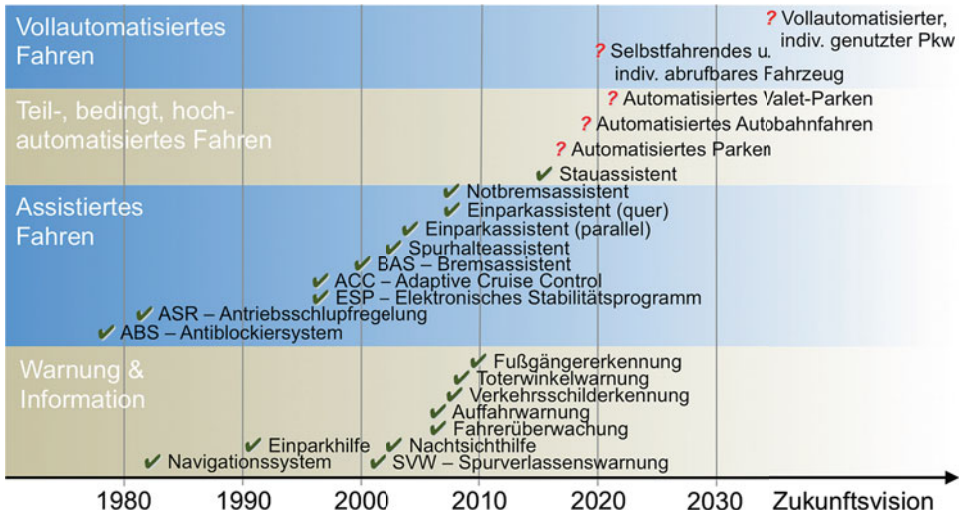


Abb. 10.1 Übersicht über die Einführung von Fahrerassistenzsystemen mit der Vision des voll-automatisierten Fahrens (Definition der Automatisierungsebenen nach SAE J3016 [3])

Abbildung 10.1 zeigt eine Übersicht über die Zeitpunkte der Einführung dieser Systeme, dabei standen bisher hauptsächlich der Sicherheitsgewinn und zum Teil die Komfortsteigerung im Vordergrund. Der zunehmende Einsatz von Fahrerassistenzsystemen und dann die schrittweise Fahrzeugautomatisierung mit entsprechend abnehmender Fahraufgabe für den Fahrer wird als evolutionäres Szenario bezeichnet und beschreibt eines der drei Einführungsszenarien, die in diesem Beitrag verglichen werden.

Derzeit ist die Automobilindustrie dabei, zum ersten Mal einen Systemverbund aus automatisierter Längs- (Antreiben, Bremsen) und Querverführung (Lenken) mit Fahrerüberwachung in Serienfahrzeuge einzuführen, was damit ein teilautomatisiertes System beschreibt. Dieser Systemverbund, der oft als Stauassistent bezeichnet wird [4, 5, 6], ist ein gemeinsamer Regelansatz aus Abstandsregeltempomat (automatisierte Längsführung) und Spurhalteassistent (automatisierte Querverführung), der das Fahrzeug im zähfließenden Verkehr automatisiert in Längs- und Querrichtung führt. Der Fahrer überwacht dabei lediglich das System, um im Bedarfsfall einzugreifen.

Als nächste Entwicklungsstufe wird eine zunehmende Automatisierung des Parkens erwartet. Bereits heute gibt es eine Vielzahl von Personenwagen, bei denen der Einparkvorgang erheblich erleichtert wird, und zwar sowohl das rechtwinklige als auch das parallele Einparken [7]. Allerdings wird hier i. A. nur die Lenkaufgabe, d.h. die für viele Fahrer schwierigere Aufgabe, vom System übernommen, während der Fahrer immer noch Antrieb und Bremse steuern muss. Damit fallen diese heutigen Systeme in die Kategorie des assistierten Fahrens. Für die nahe Zukunft sind zunehmend teilautomatisierte Konzepte für das Einparken zu erwarten, d.h. dass nach dem systemgesteuerten Lenken auch Antrieb und Bremsen automatisiert werden. Dem Fahrer wird dann nur noch die Aufgabe der System-

überwachung zukommen, indem beispielsweise eine Taste während des gesamten Einparkvorganges zu betätigen ist, womit die Aufmerksamkeit und Verantwortung des Fahrers signalisiert wird [8].

In der jüngeren Vergangenheit sind von verschiedenen Automobilherstellern Aussagen gemacht worden, die das Jahr 2020 als Ziel für das „autonome“ Fahren ankündigen [9, 10, 11]. Da der Begriff „autonom“ nicht in Übereinstimmung mit den Definitionen wie beispielsweise der SAE International oder anderen Organen verwendet wird, ist nicht mit Sicherheit zu sagen, welcher Automatisierungsgrad mit diesen Ankündigungen referenziert wird. Allerdings ist zu vermuten, dass die Funktionalität deutlich über die Teilautomatisierung hinausgeht und unter Umständen sogar bis in den Bereich der Hochautomatisierung vordringt. Das wäre dann ein Konzept, bei dem der Fahrer in speziell definierten Anwendungsfällen und -gebieten nicht einmal mehr im Notfall die Fahraufgabe übernehmen muss, vielmehr kann das System sämtliche Fahraufgaben einschließlich unvorhergesehener Situationen selbst ausführen.

Diese Ankündigungen, oft gepaart mit öffentlichen Konzeptvorstellungen höhergradig automatisierter Fahrzeuge, zeigen auch, dass derzeit viele namhafte Automobilhersteller und Systemlieferanten an Konzepten arbeiten, die die Evolution der Fahrerassistenz in Richtung des höhergradig automatisierten Fahrens vorantreiben [10, 12, 13]. Dabei werden die Fahrsicherheit entsprechend der eingangs beschriebenen Motivation für das automatisierte Fahren als oberstes Ziel und zusätzliche Effizienzsteigerung sowie Komfortgewinn als weiterer Nutzen angeführt.

Über das Zieldatum 2020 hinaus ist eine Vorhersage allerdings kaum möglich. Auch wenn einige Marktanalysten und auch mitunter Automobilfirmen die Vollautomatisierung für 2025 in Aussicht stellen [12], so ist dies doch eher als ein möglicher Meilenstein in der Evolution der Fahrerassistenz hin zum automatisierten Fahren zu sehen und sollte nicht als eine gesicherte Aussage verstanden werden, wann bestimmte Systemumfänge und Funktionen verfügbar sein werden. Derartige Projektionen sind wegen des recht langen Zeithorizonts mit Vorsicht zu genießen.

Bei einem evolutionären Einführungszenario kann angenommen werden, dass es relativ lange dauern würde, bis ein signifikanter Anteil der Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen höhergradig automatisiert ist, selbst wenn diese Fahrzeuge ab 2020 als Serienfahrzeuge zum Verkauf stünden. So hat es in der Vergangenheit ca. 15–20 Jahre gedauert, bis ABS oder ESP in allen neuen Fahrzeugen serienmäßig oder zumindest als Extraausstattung verbaut wurden [14]. Da die Gesamtheit aller Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen sich nur über einen Zeitraum von etwa 20 Jahren weitestgehend erneuert [15], ist davon auszugehen, dass unter der Annahme einer evolutionären Entwicklung in absehbarer Zukunft kaum zu erwarten ist, dass ein Großteil der Fahrzeuge ohne Fahrerinteraktion betrieben wird. Damit ist dieses Szenario ein langfristiger, aber vorhersehbarer Ansatz, besonders im Vergleich zum nachfolgend beschriebenen Szenario.

10.3.2 Umgestaltung der Individualmobilität: revolutionäres Szenario

Seit ca. 2010 ist bekannt, dass auch automobilfremde Technologiefirmen [16] an automatisierten Fahrzeugen arbeiten. Anders als bei dem zuvor diskutierten evolutionären Szenario, das die Automobilindustrie verfolgt, handelt es sich hier eher um ein revolutionäres Szenario, dessen erklärtes Ziel es ist, „Unfälle zu vermeiden, Zeit zu gewinnen und CO₂-Emissionen zu reduzieren, indem die Fahrzeugnutzung fundamental verändert wird“ [16]. Aus entsprechenden Ankündigungen und öffentlichen Konzeptvorstellungen kann geschlossen werden, dass hier nicht die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrerassistenz hin zum automatisierten Fahren verfolgt wird, sondern vielmehr der Sprung vom heutigen Verkehrsgeschehen mit fahrergeführten Fahrzeugen hin zu einem Szenario, bei dem der Fahrer die Fahraufgabe unmittelbar und vollständig an das System übergibt. Offenbar wird hier Bezug auf das vollautomatisierte oder zumindest hochautomatisierte Fahren genommen.

Besonderes Augenmerk verdient bei den Konzepten der automobilfremden Technologiefirmen der Einsatz sogenannter künstlicher Intelligenz, d. h., die Funktionalität des automatisierten Fahrens wird über lernende Algorithmen umgesetzt und weniger, wie in der Automobilindustrie üblich, durch geschlossene regelungstechnische Beschreibungen. Dadurch wird versucht, die Lücke zwischen einem rein analytischen System, das innerhalb enger Grenzen operiert, und einem regelbasierten System, welches das menschliche Verhalten nachbildet, zu schließen. Derartige lernende Systeme haben zum Ziel, über die Zeit ihre Funktionen, wie z. B. Objekterkennung, zu verbessern bzw. das Verhalten und die Präferenzen des Benutzers zu lernen. Solche Fahrzeugeigenschaften sind in der Automobilindustrie eher unüblich. Die klassische Vorgehensweise ist vielmehr, dass ein Produkt mit dem maximal möglichen Funktionsumfang eingeführt wird und darin unverändert bleibt. In der Computerbranche hingegen ist es üblich, Produkte einzuführen und deren Funktionsumfang, sei es durch Lernalgorithmen oder regelmäßige Softwareaktualisierung, dann stetig zunehmen zu lassen.

Während im vorherigen, evolutionären Szenario die Einführungsstrategien der Automobilindustrie relativ klar zu sein scheinen, ist das in dem nun betrachteten revolutionären Szenario nicht unbedingt gegeben. Vielmehr verfolgen die Akteure speziell in der Computer- und Kommunikationsindustrie (IT-Branche), bei denen es sich um automobilfremde Technologiefirmen handelt [17, 18, 19, 20, 21], ein hochkomplexes Ziel in einem für sie branchenfremden Gebiet, das nicht direkt zum Kerngeschäft passen mag. Obwohl in einem Fall offenkundig bereits mehrere hunderttausend Meilen im höhergradig automatisierten Betrieb absolviert wurden [22], ist es derzeit unklar, welche Produktziele letztlich verfolgt werden. Von den Akteuren dieses revolutionären Szenarios werden bisher kaum Angaben zu konkreten Markteinführungen gemacht, und es ist ungewiss, ob die automobilfremden Technologiefirmen sich als Fahrzeughersteller zu etablieren versuchen [23, 24]. Bisher wurden verschiedene Einsatztermine vermutet [25, 26], die in Verbindung mit anderen Beobachtungen auf diesem Gebiet zu den folgenden Einführungsszenarien führen.

Denkbar erscheint, dass die derzeit zu beobachtenden Versuchsfahrten von höhergradig automatisierten Fahrzeugen letztlich die Plattform für die Akquisition und spätere Anwendung von Karten- und Bildmaterial für die automatisierte Fahrzeugführung darstellen. Die automobilfremden Technologiefirmen könnten dann Dienstleistungen und Online-Softwareprodukte als Bestandteil einer automatisierten Fahrzeugführung anbieten und damit die Fahrzeugautomatisierung auf breiter Front vorantreiben. Damit könnten dann entsprechende Karten- und Grafikinformatoren für eine breite Anwendung zur Verfügung stehen, was eher eine kontinuierliche und weniger revolutionäre Einführung der Automatisierung wäre.

Dennoch könnte am Ende das Ziel darin bestehen, dass der Fahrer, sobald das Fahrzeug die Fahraufgabe selbsttätig und ohne Überwachungsbedarf ausführt, die Angebote aus dem Kerngeschäft dieser automobilfremden Technologiefirmen, d. h. Internetdienste, konsumiert. Der Ansatz dieser Akteure bestünde damit in einer recht langfristigen und auf den Umsatz im Kerngeschäft ausgerichteten Strategie, die versucht, die letzten noch unbesetzten Marktanteile – also den Mobilitätssektor – für das vernetzte Leben zu erschließen. Das würde bedeuten, dass der Fahrer während der Fahrt im Internet surft oder in sozialen Netzwerken aktiv ist und dabei genauso ein potenzieller Kunde von Internetdiensten ist, wie jeder andere Computernutzer auch.

Ein anderes Einführungsszenario, das besser zum Charakter der Branche zu passen scheint und auch eher eine revolutionäre Ausprägung offenbart, lässt sich aus öffentlichen Konzeptvorstellungen [24], Pressemitteilungen [22] und auch Patenten [27] der Branche ableiten. Demnach erscheint eine Einführung von höhergradig (und unter Umständen sogar voll-)automatisierten Fahrzeugen für Mobilitätsdienstleistungen wie Personen- [28, 29, 30] und Warentransport [31] möglich, und das sogar relativ zeitnah. Beispielsweise wäre denkbar, dass höhergradig automatisierte Fahrzeuge im Wettbewerb zum klassischen Taxi angeboten werden. Entsprechende Presseveröffentlichungen [22] und Medienberichte [24] scheinen ein derartiges Einführungsszenario zu favorisieren, wobei diesen Mitteilungen letztlich aber nur wenig über die wahren Ziele sowie den Entwicklungsstand der technischen Umsetzung zu entnehmen ist. Dieser Anwendungsfall entspräche dabei dem in diesem Buch als „Vehicle-on Demand“ bezeichneten Use-Case.

Eine Abwandlung des automatisierten Taxis sind auch die höhergradig automatisierten Zustelldienste, wie beispielsweise die Essenslieferung [32, 33, 34], die Hauslieferung des örtlichen Einzelhandels [31] oder auch generell die Zustellung jeglicher im Internet bestellter Waren [18]. Für derartige Beispiele sind bereits öffentlich Konzeptvorstellungen gezeigt worden. Strategische Investitionen bzw. Akquisitionen der treibenden Unternehmen legen die Vermutung nahe, dass eine zunehmende Automatisierung der Warenzustellung eine mögliche Anwendung der Fahrzeugautomatisierung ist. Ebenso mögen Tests von sogenannten Drohnen zum Ausliefern von Waren [18, 32, 33] oder auch eine automatisierte Müllentsorgung [35] in diese Richtung weisen (s. Kap.18).

Auch wenn noch viele Fragen unbeantwortet erscheinen, könnte bereits in dieser Dekade ein großer Schritt in Richtung höhergradiger Fahrzeugautomatisierung erfolgen, der unter Umständen zu Beginn als klein und sehr begrenzt erscheinen mag (z. B. vollautoma-

tisierte Taxis nur in einem Stadtteil), dessen Umsetzung sich dann allerdings schnell räumlich ausbreitet und an Marktanteil gewinnt. Ankündigungen der treibenden Firmen stützen die Vermutung, dass die Einführung höhergradig automatisierter Fahrzeuge noch vor 2020 erfolgt [22].

Mit solch einer zunächst begrenzten Einführung hätten die automobilfremden Technologiefirmen die Möglichkeit, schon bald viel Erfahrung und Datenmaterial zu sammeln, auch was die öffentliche Reaktion betrifft, und dies dann für einen zügigen Ausbau auf regionaler, nationaler und letztlich globaler Ebene zu nutzen. Eine derartige Einführungsstrategie wäre für die etablierte Automobilindustrie eher ungewöhnlich und unter Umständen imageschädigend. Für die nichtautomobilen Technologiefirmen dagegen ist eine solche Vorgehensweise üblich. Sie hat in der Vergangenheit bei anderen Produkten durchaus zu einem positiven Image beigetragen, da eine begrenzte Einführung eine gewisse Exklusivität mit sich bringt [36, 37].

10.3.3 Zusammenwachsen von Individualmobilität und öffentlichem Personentransport: transformatives Szenario

Ein weiteres Einführungsszenario für das automatisierte Fahren besteht in der Implementierung von Mobilitätslösungen, die beispielsweise im innerstädtischen Bereich langsam fahrende Fahrzeuge zur Personenbeförderung anbieten. Derartige Fahrzeuge könnten vom Verbraucher per Smartphone-App angefordert und für eine vergleichsweise kurze Strecke genutzt werden (s. Use-Case „Vehicle-on-Demand“ Kap. 2). Die Treiber derartiger Konzepte sind oft Firmenneugründungen im Hochtechnologiesektor, aber auch Mobilitätsdienstleister, Gemeinden oder Betreiber von Vergnügungsparks oder Ähnlichem. Ziel ist es hier, die Vorteile von Individualmobilität (Unabhängigkeit und Flexibilität) mit denen des öffentlichen Personentransports (Energieeffizienz und Raumökonomie) zu kombinieren und damit entsprechend der eingangs beschriebenen Motivation für das automatisierte Fahren vorrangig Vermeidung von Staus im innerstädtischen Bereich zu erreichen (s. Kap. 9).

Die Beweggründe für die Firmenneugründungen, sich in derartigen Bereichen zu betätigen, liegen in der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und dem Einsatz neuer Technologien. Dabei bietet besonders der Einsatz der mittlerweile als modulare Komponenten weitverbreitet verfügbaren Systeme in der Bildverarbeitung, Objekterkennung und Routenplanung auch fachfremden Firmen Möglichkeiten, höhergradig automatisierte Mobilitätskonzepte mit begrenztem Einsatzgebiet umzusetzen. Die verfolgten Konzepte für eine Markteinführung sind häufig Angebote für die sogenannte „erste bzw. letzte Meile“, d. h. langsam fahrende und gebietsbeschränkte Fahrzeuge, die das privat genutzte Automobil oder den öffentlichen Personentransport komplementieren. Konkrete Anwendungsbeispiele sind die Erweiterung der Angebote von Bussen und Stadtbahnen, wo ein fahrplanmäßiger Betrieb aus infrastrukturellen oder finanziellen Gründen nicht möglich ist, oder Shuttle-Dienste im Anschluss an eine Autofahrt, die beispielsweise auf einem Parkplatz am Stadt-

rand oder bei einem Vergnügungspark endet und dann mit einem lokalen Mobilitätsdienstleister fortgesetzt wird. Damit kommen solche Konzepte vorrangig dort zum Einsatz, wo ein individuell genutzter Pkw nicht praktikabel oder zulässig ist oder der auf einen bestimmten Fahrplan festgelegte Bus nicht flexibel genug ist.

Diese Mobilitätsangebote stehen im Wettbewerb zum klassischen Taxi, jedoch stellen sie sowohl für den Verbraucher als auch den Betreiber eine kostengünstigere, komfortable und innovative Mobilitätslösung dar [38]. Aufgrund ihrer Eigenschaften werden diese Konzepte englischsprachig auch Automated Mobility On-Demand (AMOD) genannt. Sie stellen eine Individualisierung des öffentlichen Personentransports dar, mit dem Ziel, den innerstädtischen Verkehr zu transformieren (s. Kap. 9; Kap. 11). Der Anreiz, solche Konzepte einzuführen, besteht für die treibenden Unternehmen darin, neue Geschäftsfelder zu erschließen bzw. bestehende zu erweitern. Im Vergleich zum bestehenden Taximodell ist zu beachten, dass der Taxibranche bisher ein vergleichsweise lohnkostenintensives Geschäftsmodell zugrunde liegt. Aufgrund des reduzierten Personaleinsatzes durch automatisierte Fahrzeuge wird nun eine Gewinnsteigerung erwartet [38], die allerdings auch von Personalabbau in dem entsprechenden Bereich begleitet wäre.

Es erscheint durchaus denkbar, dass automatisierte Fahrzeuge durch die Verknüpfung von Individualmobilität und öffentlichem Personentransport zu einer Transformation des Straßenverkehrs in Städten führen. Aufgrund des von vorneherein begrenzten Einsatzgebiets und der geringen Fahrgeschwindigkeit ergeben sich gegenüber den beiden ersten hier diskutierten Szenarien viele Vereinfachungen, die eine baldige und vergleichsweise einfache Implementierung erwarten lassen. So erscheint es realistisch, dass bis 2020 verschiedene Einsätze von AMOD in begrenztem Umfang erfolgen werden.

Derzeit gibt es für das transformative Szenario erste Umsetzungen oder sind in absehbarer Zeit geplant [24, 39, 40, 41, 42, 43]. Es ist zu erkennen, dass in verschiedenen Städten für die entsprechenden Einsatzfälle Betriebsbedingungen vorliegen, die zumindest zunächst einen versuchsweisen Betrieb für AMOD-Systeme ermöglichen. Dabei wird abzuwarten sein, inwieweit Nutzer das Angebot annehmen und es zu einem profitablen Geschäftsmodell kommt. Auch wenn die ersten Umsetzungen eher als erweiterter Versuchsbetrieb zwischen einer öffentlichen Konzeptvorstellung und einer tatsächlichen kommerziellen Anwendung zu sehen sind, sind diese Umsetzungen bislang der deutlichste Schritt in Richtung eines Einsatzes höhergradig automatisierter Fahrzeuge. Die beiden anderen (evolutionären und revolutionären) Szenarien können daraus Erfahrungswerte sowie Umsetzungspraktiken übernehmen.

Aufgrund grundsätzlich recht positiver Rahmenbedingungen ist zu erwarten, dass verschiedene Stadtverwaltungen und Betreiber von Freizeitparks, Einkaufszentren oder sonstigen Großeinrichtungen automatisierte Transportsysteme kurzfristig und punktuell einführen werden. Damit erscheint es auch als sehr wahrscheinlich, dass durch entsprechende Umsetzungsbeispiele bis zum Ende dieser Dekade bereits recht vielfältige Erfahrungen bezüglich der Akzeptanz durch Benutzer und andere Verkehrsteilnehmer vorliegen werden. Dabei kann trotz der Vereinfachungen angesichts des eingeschränkten Einsatzgebiets und der geringen Fahrgeschwindigkeit auch für das von der Automobilindustrie verfolgte evo-

lutionäre Einführungsszenario automatisierte Fahrzeuge auf öffentlichen Stadt- und Fernstraßen gelernt werden. So kann beispielsweise schon aus dem begrenzten Einsatzfall der Hoch- bzw. Vollautomatisierung mit den AMOD viel bezüglich der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern (sowohl konventionelle Fahrzeuge als auch Fußgänger und Radfahrer) oder auch hinsichtlich der Sicherheitskonzepte sowie Infrastrukturanforderungen für einen späteren Betrieb auf öffentlichen Straßen abgeleitet werden. Außerdem kann angenommen werden, dass der zu Beginn gegebenenfalls begrenzte Einsatzbereich von AMOD mit der Zeit ausgeweitet wird, d. h. dass ein automatisiertes Mobilitätskonzept nach und nach auf den öffentlichen Straßenverkehr ausgeweitet wird und dann dort auf konventionelle bzw. automatisierte Pkw trifft.

10.4 Vergleichende Betrachtung der Szenarien

Nachdem die Einführungsszenarien im vorherigen Abschnitt einzeln vorgestellt worden sind, erfolgt im Folgenden eine vergleichende Betrachtung auf verschiedenen Ebenen. Wie zuvor gezeigt wurde, haben diese Szenarien sowohl unterschiedliche als auch gemeinsame Zielsetzungen bezüglich des Nutzens für den Verbraucher, der treibenden Unternehmen und auch des Verkehrs als Ganzem. Ziel des folgenden Abschnitts ist es nun, Unterschiede deutlicher herausstellen, aber auch Gemeinsamkeiten zu erschließen.

10.4.1 Systemischer Vergleich

Für den systemischen Vergleich der in Tab. 10.1 zusammengefassten drei Einführungsszenarien soll eine Gesamtbetrachtung des Anwendungsfalls für das höhergradig automatisierte Fahren angestellt werden, d. h., Zielsetzungen, Umsetzungsmöglichkeiten sowie Betriebsmodelle der einzelnen Szenarien sollen gegenübergestellt werden.

Wie eingangs ausgeführt wurde, verfolgen alle drei Szenarien das Ziel, die Sicherheit und Effizienz im Straßenverkehr zu erhöhen sowie Mobilität und Komfort zu steigern.

Tab. 10.1 Charakteristiken der betrachteten Einführungsszenarien

	Evolution	Revolution	Transformation
Automatisierung	teil/bedingt	bedingt/hoch/voll	hoch/voll
Gebietsbegrenzung	keine	regional	lokal
Betrieb	Laien	Fachpersonal u./o. Laien	Fachpersonal
Nutzung	individuell/ privat	individuell/ privat oder öffentlich	individuell/ öffentlich
Eigentümerschaft	individuell/ privat	zentral/ kommerziell	zentral/ kommerziell

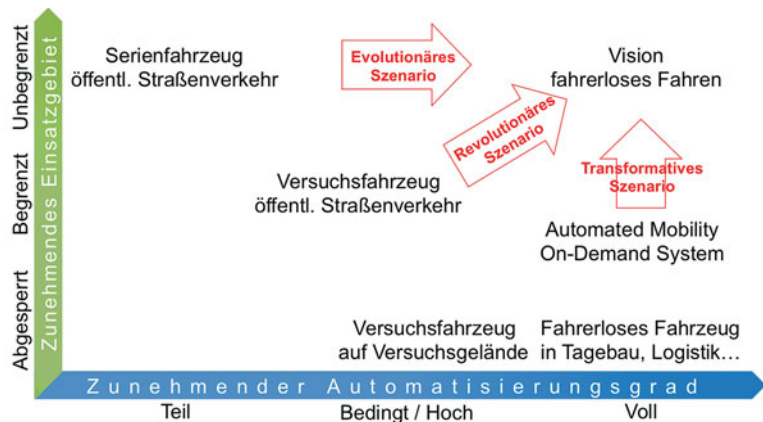


Abb. 10.2 Einsatzmöglichkeiten für das automatisierte Fahren nach Automatisierungsgrad und Einsatzgebiet

Dabei erfolgt eine zunehmende Spezialisierung für die Verwendung eines Fahrzeugs oder auch Assistenzsystems. So wird beispielsweise für Pkw das höhergradig automatisierte Fahren zu Beginn nur auf Schnellstraßen und Autobahnen oder beim Parken, also für spezielle Fahrsituationen, angeboten; neue Mobilitätskonzepte werden zunächst nur in begrenzten Gebieten wie z. B. Einkaufszentren oder Freizeitparks (speziellen Einsatzgebieten also) eingesetzt. Damit würde sich eine deutlichere Spezialisierung des Fahrens bzw. von Systemfunktionen ergeben, als es bisher der Fall ist. Bislang ist es üblich, dass ein individuell genutzter Pkw der Erwartung „jedermann, immer, überall“ gerecht wird. Oder mit anderen Worten: Sofern die entsprechende Erlaubnis gegeben ist, kann jedermann einen Pkw benutzen, und das zu jeder Zeit und an jedem Ort. Mit dem höhergradig automatisierten Fahren mag sich dem Nutzer ein Szenario eröffnen, bei dem die Benutzung mehr eingeschränkt oder auch anwendungsspezifischer ist, was ein entsprechendes Umdenken erfordert.

Diese Einschränkungen werden in Abb. 10.2 deutlich, die Automatisierungsgrad und Einsatzgebiet gegenüberstellt. Diese beiden Komponenten stellen die vielleicht wichtigsten Klassifizierungsmerkmale für das automatisierte Fahren dar und ermöglichen einen guten Vergleich der drei hier vorgestellten Einführungsszenarien. Das evolutionäre Szenario, die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrerassistenzsysteme, ist auf ein unbegrenztes Einsatzgebiet ausgerichtet, wie beispielsweise „alle Schnellstraßen und Autobahnen“ oder „jede Parklücke“. Es bietet allerdings zunächst nur eine vergleichsweise niedrige Automatisierung. Dagegen implizieren das revolutionäre, auf die Umgestaltung der Individualmobilität abzielende Szenario, sowie das transformativ, das Zusammenwachsen von Individualmobilität und öffentlichem Personentransport begünstigende Szenario, einen sehr hohen Automatisierungsgrad. In beiden Fällen ist eine rasche Entwicklung hin zu einem vollautomatisierten Szenario denkbar, jedoch in einem begrenzten Einsatzgebiet, wie beispielsweise in einem bestimmten Stadtteil oder im Umfeld eines Einkaufszentrums

oder Freizeitparks. Damit kann vereinfachend gesagt werden, dass sich das evolutionäre Szenario dem Ziel der Vollautomatisierung mit einem Ansatz „unbegrenzttes Einsatzgebiet und begrenzte Automatisierung“ nähert, das revolutionäre und transformative Szenario dagegen mit einem Ansatz „begrenzttes Einsatzgebiet und unbegrenzte Automatisierung“.

Besonders interessant ist beim Vergleich in Abb. 10.2, dass sich das revolutionäre Szenario auf keiner der beiden Achsen im Vergleich zu dem evolutionären bzw. transformativen Szenario heraushebt, aber in der Gesamtsicht dem Zielszenario eines vollautomatisierten und unbegrenzt zu nutzenden Fahrzeugs am nächsten kommt. Damit scheint dieses Szenario dem „jedermann, immer, überall“ durch die Kombination eines vergleichsweise großen Einsatzgebiets mit vergleichsweise hoher Automatisierung am ehesten zu entsprechen.

Für das transformative Szenario ist besonders zu betrachten, durch wen die Fahrzeuge betrieben werden. Zu erwarten ist, dass geschultes Fachpersonal den Betrieb der Fahrzeuge überwacht oder zumindest eine regelmäßige, z. B. tägliche, technische Überprüfung vornimmt. Das Szenario ist damit deutlich vom Betrieb individuell genutzter Pkw zu unterscheiden, bei denen abgesehen von einer gelegentlichen Wartung kein Fachpersonal in den Betrieb involviert ist, sondern als technische Laien zu betrachtende Personen die Fahrzeuge betreiben. Dadurch stellt der Anwendungsfall „jedermann, immer, überall“ für das evolutionäre Szenario eine ganz besondere Herausforderung dar, weil eine extrem hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit auch ohne eine kontinuierliche Fachbetreuung zu gewährleisten sind. Dessen ungeachtet erweisen sich die revolutionären und transformativen Szenarien bei der Vorbereitung höhergradig automatisierter und individuell genutzter Pkw als hilfreich, da sich unter Aufsicht durch Fachpersonal schon frühzeitig Erfahrungswerte aus dem Betrieb dieser Fahrzeuge ableiten lassen.

Ein möglicher Anwendungsfall für höhergradig automatisierte Fahrzeuge, der sich nicht direkt in die genannten drei Entwicklungsszenarien eingliedern lässt, dem aber doch eine besondere Bedeutung zukommt, ist ein automatisierter Konvoi auf Schnellstraßen oder Autobahnen. Bei diesem Anwendungsfall werden mehrere ansonsten individuell genutzte Fahrzeuge durch eine gemeinsame Kommunikationsinfrastruktur zu einem virtuellen Gespann zusammengekoppelt. So kann dann die Längs- und Querführung automatisiert werden, allerdings ist dazu auch ein besonderer Kommunikationsstandard erforderlich und nur damit kompatible Fahrzeuge können eingebunden werden. Das erste Fahrzeug in solch einem Konvoi wird – zumindest vorläufig – von einem professionellen Fahrer geführt werden, alle nachfolgenden Fahrzeuge benötigen dagegen keine dauernde Überwachung und greifen nur in Ausnahmesituationen auf den Fahrer zurück [44].

Das Szenario für den automatisierten Fahrzeugkonvoi vereint verschiedene Eigenarten der evolutionären und transformativen Szenarien, die es auch realistisch erscheinen lassen, derartige Konzepte zeitnah im allgemeinen Straßenverkehr umzusetzen. Damit können auf der einen Seite bereits frühzeitig Szenarien mit höhergradig automatisierten Fahrzeugen realisiert werden, da die gegebenenfalls eingeschränkten Objekt- und Situationserkennungsfähigkeiten automatisierter Systeme durch die Leistungsfähigkeit und Erfahrung des Fahrers im Führungsfahrzeug komplementiert werden können. Auf der anderen

Seite können aber auch zusätzliche Problemstellungen auftreten, wie beispielsweise das Ein-/Ausseren aus dem Konvoi, das Überholen durch andere Fahrzeuge oder aber auch die Einhaltung des gesetzlichen Mindestabstandes.

10.4.2 Technischer Vergleich

Aus dem systemischen Vergleich wurden bereits einige Unterschiede zwischen den Einführungsszenarien deutlich, die auch unterschiedliche Anforderungen an die Zuverlässigkeit oder genauer gesagt an die Vollständigkeit und Verfügbarkeit der erforderlichen Technologie betrachten. Da im Falle des evolutionären Szenarios der individuell genutzte Pkw ohne zeitliche oder räumliche Einschränkung für jedermann verfügbar funktionieren muss, ergeben sich daraus andere technische Anforderungen als wenn beispielsweise im transformativen Szenario ein vollautomatisiertes Fahrzeug nur in einem eng begrenzten Bereich und von Betriebspersonal überwacht betrieben wird. Außerdem mögen die Stückzahlen der betrachteten Fahrzeuge und damit Systemkomponenten sehr unterschiedlich sein, was einen Einfluss auf die zum Einsatz kommende Technologie haben kann.

Damit kann verallgemeinernd für das evolutionäre Szenario festgestellt werden, dass hier hochgradig ausfallsichere (d. h. redundant und mit Rückfallebenen versehene), wartungsarme (d. h. selbstkalibrierende und selbstüberwachende) und kostengünstige (d. h. massenproduzierte) Komponenten als Sensoren und Prozessoren zum Einsatz kommen, die ein Höchstmaß an Verfügbarkeit ermöglichen (s. Tab. 10.2). Für das transformative Szenario dagegen sind hochgenaue und individuell konfigurierbare Spezialsysteme von Vorteil, die ein Höchstmaß an Automatisierung schon zu einem frühen Einsatzzeitpunkt, wenn auch mit höherem Infrastrukturaufwand, erlauben. Der spezielle Infrastrukturaufwand für das transformative Szenario liegt in einem Kommunikationssystem, das einen koordinierten und sicheren Betrieb vollautomatisierter Fahrzeuge erlaubt oder auch den Einsatz von Wartungs- und Überwachungspersonal erfordert, das die Funktionssicherheit der Fahrzeuge durch regelmäßige und bedarfsgerechte Wartung gewährleistet.

Tab. 10.2 Qualitativer Vergleich der Systemanforderungen für die drei betrachteten Einführungsszenarien

	Evolution	Revolution	Transformation
Ausfallsicherheit	++	++	+
Präzision	+	++	++
Konfigurierbarkeit	0	+	++
Wartungsaufwand	–	+	++
Fernüberwachung	--	+	++
Systemkosten	–	+	++

++ (hoch), + (signifikant), 0 (neutral), – (gering), -- (nicht zutreffend)

Die Anforderungen für das revolutionäre Einsatzszenario, bei dem der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen funktional und räumlich begrenzt erfolgt, sind zwischen den technischen Anforderungen des evolutionären und des transformativen Szenarios anzusiedeln, da hier von einer zentral betriebenen und professionell gewarteten Fahrzeugflotte ausgegangen wird, die aber nicht notwendigerweise dauerhaft überwacht wird. Damit sind hochgradig ausfallsichere und hochgenaue Systeme erforderlich, die vermutlich mit recht hohen Kosten verbunden sind.

Bei den Einführungsszenarien kommt dem Einsatz einer Kommunikationsinfrastruktur für höhergradig automatisierte Fahrzeuge eine besondere Bedeutung zu. So können beispielsweise durch Fahrzeug-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation weitere Daten wie Fahrzeugpositionen, Fahrgeschwindigkeiten und andere Parameter ausgetauscht und somit für die Streckenführung oder auch für eine zentrale Fahrzeugkoordination verwendet werden. Derzeit scheint sich in Industrie und Forschung ein Trend abzuzeichnen, dass bei zunehmender Automatisierung auch eine zunehmende Vernetzung von Fahrzeugen gefordert wird. In dem Zusammenhang ist auch von besonderer Bedeutung, dass die Gesetzgebung in verschiedenen Ländern den Ausbau von Fahrzeug-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation vorantreiben will [45, 46, 47, 48].

10.4.3 Regulatorischer Vergleich

Die drei Szenarien lassen sich auch durch die zur Anwendung kommende Rechtsprechung unterscheiden. Da für das evolutionäre Szenario gelten soll, dass diese Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr betrieben werden und keiner räumlichen oder zeitlichen Einschränkung unterliegen sollen, muss dies im Einklang mit der entsprechend geltenden Straßenverkehrsordnung erfolgen. Dies hat zur Folge, dass derzeit nicht *a priori* geklärt ist, in welchen Rechtsgebieten und zu welchem Grad automatisierte Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr betrieben werden dürfen.

Für das transformative Szenario gelten dagegen andere Verhältnisse. Besonders aufgrund des hier angenommenen räumlich begrenzten Einsatzes, zunächst vermutlich nicht auf öffentlichen Straßen und auch nicht in sonstigen uneingeschränkt zugänglichen Bereichen (sondern beispielsweise nur in Einkaufszentren oder Vergnügungsparks mit gesonderter Zugangsregelung), kann auch gegebenenfalls eine Sondergesetzgebung implementiert werden. Das bedeutet, dass für das entsprechende Gebiet, in dem die automatisierten Fahrzeuge betrieben werden, besondere Regeln erstellt werden, nur eine bestimmte Personengruppe Zugang hat oder alle anwesenden Personen ihr Einverständnis geben. Insbesondere das Letztere würde den Betrieb erheblich erleichtern, da beispielsweise die Betriebshaftung oder auch Aufsichtspflicht bedarfsspezifisch geregelt werden könnten.

Das revolutionäre Szenario ist zwischen dem evolutionären und transformativen anzusiedeln. Wenn angenommen wird, dass derartige Konzepte zunächst regional begrenzt sind, beispielsweise auf einen Stadtteil oder eine bestimmte Fernstraßenroute, so würde dort zwar die generelle Straßenverkehrsordnung gelten, allerdings wären Sonderregelungen

denkbar, beispielsweise dass spezielle Einschränkungen, Erlaubnisse oder Haftungsmechanismen nur für einen bestimmten Streckenabschnitt oder ein bestimmtes Gebiet gelten.

In Zusammenhang mit der jeweiligen Rechtsprechung ist es auch wichtig zu berücksichtigen, wie sich die Gesetzgeber in ihren entsprechenden Einflussbereichen der Fahrzeugautomatisierung annehmen. So wurden in den USA beispielsweise in einigen Bundesstaaten Gesetzesrahmen vorgegeben (die Vorreiter sind Nevada, Florida und Kalifornien), die den Betrieb höhergradig automatisierter Fahrzeuge regeln, wenn auch oft zunächst nur für den Versuchsbetrieb. Auf Bundesebene hat dagegen die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Zurückhaltung signalisiert und eine koordinierte Einführung gemeinsam mit der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation vorgeschlagen [49]. In Japan hat die Regierung die Automatisierung des Straßenverkehrs als strategisches Ziel ausgemerkt und der Industrie damit Unterstützung zur Seite gestellt [50, 51]. In Europa verhalten sich die Regierungen bezüglich der Automatisierung – abgesehen von der kontinuierlichen Beteiligung an Forschungsprojekten [44, 47, 48, 52, 53, 54] – noch zurückhaltend, jedoch wird auch hier eine Intensivierung des Themas für die zweite Hälfte der Dekade 2010–2020 erwartet, was auch bereits in ersten Gesetzesvorstößen [55] sichtbar wird (s. Kap. 25).

10.4.4 Unternehmensstrategischer Vergleich

In der Vorstellung der Einführungsszenarien wurden bereits die treibenden Akteure bzw. Unternehmenskategorien für die drei Fälle benannt. Das evolutionäre Szenario scheint eher von den etablierten Automobilherstellern und Systemzulieferern verfolgt zu werden, das revolutionäre von automobilfremden Technologiefirmen der Computer- und Kommunikationsbranche und das transformative von Firmenneugründungen sowie Dienstleistern.

Mit der Kategorisierung sind Unternehmenseigenarten, -zielsetzungen und -strategien verbunden, die in Tab. 10.3 gegenübergestellt sind. So können die etablierten Unternehmen der Automobilbranche auf Erfahrungen sowie Prozesse zurückgreifen, die es erlauben, Entwicklungsprojekte zum automatisierten Fahren mit entsprechender Planungssicherheit bis zur Markteinführung umzusetzen. Darin ist auch hauptsächlich der evolutionäre Ansatz verwurzelt, d. h. dass der bestehende Entwicklungs-, Produktions- und Vertriebsprozess auf die neue Produktausrichtung (das automatisierte Fahren) angewandt wird. Damit lassen sich nur recht schwer vollkommen neue Produkte oder Prozesse umsetzen. Der Automobilindustrie ist es auch eigen, dass die bestehende Marktposition bzw. Unternehmenshistorie mitunter zu einem für Außenstehende als zurückhaltend wahrgenommenen Vorgehen führt.

Die Ursache für die Zurückhaltung der Automobilindustrie mag auch darin zu sehen sein, dass der Ruf der Unternehmen, also das Markenimage beim Kunden, über Jahrzehnte aufgebaut und geschärft worden ist und einen sehr schätzenswerten Faktor darstellt (s. Kap. 32). Der Ruf kann durch unzuverlässige oder gar unsichere Produkte schnell und nachhaltig gefährdet werden und sich langfristig auf den Geschäftserfolg eines Unternehmens auswirken. Dieses Risiko wird gerade bei einer vorschnellen Einführung automatisierter Fahrzeuge gesehen. Dass derartige Bedenken durchaus ihre Berechtigung haben,

Tab. 10.3 Übersicht über verschiedene unternehmensstrategische Eigenarten bezüglich der Einführungsszenarien

	Evolution	Revolution	Transformation
Haupttreiber	Automobilindustrie (Hersteller, Zulieferer)	automobilfremde Technologiefirmen	Firmenneugründungen in Hochtechnologie
Zielsetzung	Festigung der Marktposition, Steigerung v. Sicherheit & Komfort	Erkundung neuer Geschäftsmodelle, Erweiterung Kerngeschäft	Schaffung neuer Dienstleistung für Stadtmobilität
Kompetenz, Eigenarten	<ul style="list-style-type: none"> • Versuch, Absicherung • Produktion • Vertrieb • Marketing / Verkauf • Betrieb • Instandhaltung 	<ul style="list-style-type: none"> • künstliche Intelligenz • digitale Karten • öffentlicher Versuch • unkonventionelle Produkte • Online-Dienste • neue Geschäftsmodelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Bildverarbeitung • Sensortechnologie • neue Produkte und Geschäftsmodelle • schlanke, unkonventionelle Prozesse

ist immer wieder an Beispielen zu erkennen, wenn Fahrzeugprodukte nicht die Kundenerwartungen erfüllen oder sogar ein Sicherheitsrisiko vermutet wird und die Verbraucher dann negativ auf die entsprechende Marke reagieren [56, 57, 58, 59]. Derartige Bedenken, ob begründet oder nicht, könnten zur verzögerten Markteinführung der hier betrachteten hochgradig sicherheitsrelevanten und im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses stehenden Technologie des automatisierten Fahrens führen.

Derlei Mechanismen sind für Firmenneugründungen, die das transformative Szenario verfolgen, eher fremd, da die betrachteten Firmen i. A. keine lange Geschichte und kein (Automobil-)Markenimage haben. Außerdem können sie kaum auf eine langjährige Erfahrung bei Entwicklung, Produktion und Vertrieb von Automobilen zurückgreifen. Dadurch sind diese Firmen eher in der Lage, weitestgehend neue Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln und anzubieten, wie es das betrachtete transformative Szenario erfordert. Diese Firmen gehen kaum das Risiko ein, dass der langwierig entwickelte Unternehmensruf beim Verbraucher geschädigt wird, wenn ein Produkt nicht die Erwartungen am Markt erfüllt.

Außerdem sind Firmenneugründungen oftmals in der Lage bzw. fast gezwungen, aufgrund der häufig kleinen Unternehmensgröße alternative und damit durchaus innovative Prozesse und Produktlösungen zu entwickeln. Aus diesen Gründen können die Firmenneugründungen entsprechende Konzepte zum automatisierten Fahren flexibler gestalten und gegebenenfalls eine risikoreichere Umsetzung verfolgen. Allerdings unterliegen die Firmenneugründungen der Herausforderung, dass die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge aufgrund der Systemkomplexität und des Komponenteneinsatzes oftmals nur mittels hohen Kapitaleinsatzes zu realisieren ist, und dies mit einer vergleichsweise langen Vorlaufzeit, bis ein fertiges Produkt überhaupt einen Verkaufserlös erzielen kann. Deswegen sind diese Firmen häufig auf Risikokapitalgeber angewiesen und der Fortbestand der Unternehmen kann bisweilen unklar sein.

Auch hier liegt das revolutionäre Szenario wieder zwischen den beiden anderen. Wie zuvor ausgeführt, sind die Akteure hier häufig automobilfremde Technologiefirmen, die auf der einen Seite oft über ausreichendes Kapital verfügen und auf der anderen Seite auch neue Prozesse in die Automobilentwicklung einbringen können. Aus diesen Gründen erscheint es plausibel, dass gerade aus diesem Segment ein revolutionäres Szenario erwartet werden kann. Mittlerweile paart sich mit dieser Konstellation auch zunehmende Erfahrung mit Mobilitätssystemen, so wie eines der betrachteten Unternehmen der Computer- und Kommunikationsindustrie nach eigenen Angaben bereits über eine Million Kilometer mit höhergradig automatisierten Fahrzeugen zurückgelegt hat [22] und auch in den Personen- [28] sowie Warentransport [31] involviert ist.

10.5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden drei Szenarien für die Einführung von höhergradig automatisierten Fahrzeugen betrachtet: die Evolution der Fahrerassistenzsysteme durch die etablierte Automobilindustrie, die Revolution der Individualmobilität durch automobilfremde Technologiefirmen und das Zusammenwachsen der Individualmobilität mit der öffentlichen Personenbeförderung als Transformation durch Firmenneugründungen und Mobilitätsdienstleister. Bisher scheinen diese drei Richtungen noch weitestgehend unabhängig voneinander beschritten zu werden bzw. bisweilen in Konkurrenz zu stehen. Allerdings können für die Einführung des höhergradig automatisierten Fahrens Synergien erschlossen werden, die sich besonders im Bereich der Infrastruktur und Akzeptanz in der Öffentlichkeit finden lassen. Dabei ist zu beobachten, dass alle drei Einführungsszenarien letztlich auf dasselbe Endszenario zusteuern, nämlich die heute von Menschen gesteuerten Fahrzeuge in Zukunft vollständig automatisiert zu betreiben und damit neue Anwendungsfälle, Geschäftsmodelle und auch verändertes Mobilitätsverhalten zu generieren.

Die unterschiedlichen Szenarien verdeutlichen, dass die höhergradig automatisierten Fahrzeuge voraussichtlich in unterschiedlichen Einsatzgebieten eingeführt werden, die sich sowohl hinsichtlich ihrer regionalen Lage als auch ihrer Größe unterscheiden. Außerdem ist zu vermuten, dass die Einführungszeitpunkte zwischen den Szenarien variieren und sich ein gestaffeltes Gesamtbild ergibt. Es kann verallgemeinernd in Aussicht gestellt werden, dass sich über die nächsten Dekaden bei der öffentlichen Einführung höhergradig automatisierter Fahrzeuge eine zeitliche Abfolge vom transformativen über das revolutionäre zum evolutionären Szenario ergeben mag. Die Einsatzgebiete würden dabei von lokaler über regionale bis hin zu globaler Reichweite wachsen.

Damit bleibt zu vermuten, dass sich zusätzlich zu den vollautomatisierten, langsam fahrenden und gebietsbeschränkten Mobilitätsangeboten, die derzeit im erweiterten Versuchsbetrieb in der Öffentlichkeit eingeführt werden, bis zum Ende dieser Dekade lokale vollautomatisierte Taxiangebote entwickeln könnten, die dann ab 2020 den generellen Betrieb höhergradig automatisierter Fahrzeuge auf Fern-, Land- und Stadtstraßen vorbereiten. Mit dieser Entwicklung lassen sich über die nächsten Jahrzehnte noch viele Poten-

ziale für die Steigerung der Sicherheit, Effizienz sowie des Komforts und der Produktivität beim Autofahren nutzen. Während die verschiedenen Szenarien durchaus Synergien untereinander nutzen können, ergeben sich weitere wertvolle Anknüpfungspunkte bei anderen Fahrzeugautomatisierungen, die beispielsweise von Logistikzentren, Containerhäfen, Landwirtschaft oder Tagebergbau bis hin zu Roboterfahrzeugen zur Erkundung entfernter Planeten reichen.

Literatur

1. "Early Estimate of Motor Vehicle Traffic Fatalities in 2013", National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Washington, USA (Mai 2014)
2. „Polizeilich erfasste Unfälle – Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland (2014)
3. SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems" (16. Jan 2014)
4. "Traffic jam assistant", Bayerische Motoren Werke Unternehmenswebseite, http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/x/x5/2013/showroom/driver_assistance/traffic_jam_assistant.html#t=l (abgerufen 27. Jun 2014)
5. „Der neue Passat – Generation 8: Technik-Preview“, Volkswagen Unternehmenswebseite, <http://www.volkswagen.de/de/technologie/der-neue-passat.html> (abgerufen 27. Jun 2014)
6. „DISTRONIC Plus with Steering Assist and Stop&Go Pilot in the S- and E-Class“, Daimler Unternehmenswebseite, <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210218-1-1210321-1-0-0-1210228-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html> (abgerufen 27. Jun 2014)
7. "Intelligent Parking Assist System", Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_Parking_Assist_System (abgerufen 27. Jun 2014)
8. Boeriu, H., "BMW Remote Controlled Parking", BMW Blog, <http://www.bmwblog.com/2010/10/10/bmw-remote-controlled-parking/> (10. Okt 2010, abgerufen 27. Jun 2014)
9. "Nissan Announces Unprecedented Autonomous Drive Benchmarks", Nissan Pressemitteilung (27. Aug 2012)
10. Preisinger, I., "Daimler aims to launch self-driving car by 2020", Reuters, <http://www.reuters.com/article/2013/09/08/us-autoshow-frankfurt-daimler-selfdrive-idUSBRE98709A20130908> (8. Sep 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
11. Cheng, R., "General Motors President sees self-driving cars by 2020", cnet, <http://www.cnet.com/news/general-motors-president-sees-self-driving-cars-by-2020/> (25. Mar 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
12. "Continental Strategy Focuses on Automated Driving", Continental Pressemitteilung (18. Dez 2012)
13. Becker, J. u.a., "Bosch's Vision and Roadmap Toward Fully Autonomous Driving", veröffentlicht in "Road Vehicle Automation", Springer Lecture Notes in Mobility (2014)
14. "ESC Installation Rates Worldwide by New Car Registration", Bosch Unternehmenswebseite, <http://www.bosch.co.jp/en/press/pdf/rbjp-1009-02-01.pdf> (abgerufen 27. Jun 2014)
15. McBride, B., "Vehicle Sales: Fleet Turnover Ratio", Calculated Risk, <http://www.calculatedriskblog.com/2010/12/vehicle-sales-fleet-turnover-ratio.html>, (26. Dez 2010, abgerufen 27. Jun 2014)
16. "What we're driving at", Google Official Blog, <http://googleblog.blogspot.com/2010/10/what-were-driving-at.html> (9. Okt 2010, abgerufen 27. Jun 2014)
17. Bilger, B. "Auto Correct – Has the self-driving car at last arrived?", The New Yorker http://www.newyorker.com/reporting/2013/11/25/131125fa_fact_bilger (25. Nov 2013, abgerufen 27. Jun 2014)

18. Wohlsen, M., "Jeff Bezos Says Amazon Is Seriously Serious About Drone Deliveries", Wired, <http://www.wired.com/2014/04/amazon-delivery-drones/> (11. Apr 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
19. Ingram, A., "Nokia Joins Autonomous Car Development With \$100M Fund", Motorauthority, http://www.motorauthority.com/news/1091948_nokia-joins-autonomous-car-development-with-100m-fund (7. Mai 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
20. King, I., "Intel Chases Sales on Silicon Road to Driverless Cars", Bloomberg, <http://www.bloomberg.com/news/2014-06-30/intel-chases-sales-on-silicon-road-to-driverless-cars.html> (29. Jun 2014, abgerufen 30. Jun 2014)
21. "High Definition Lidar", Velodyne Unternehmenswebseite, <http://velodynelidar.com/lidar/lidar.aspx> (abgerufen 27. Jun 2014)
22. "The latest chapter for the self-driving car: mastering city street driving", Google Official Blog, <http://googleblog.blogspot.de/2014/04/the-latest-chapter-for-self-driving-car.html> (28. Apr 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
23. White, J.B., "Google Seeks Path To Market for Self-Driving Cars", The Wall Street Journal, <http://blogs.wsj.com/drivers-seat/2012/04/25/google-seeks-path-to-market-for-self-driving-cars/tab/print/> (25. Apr 2012, abgerufen 2014)
24. Stewart, J., "Google is to start building its own self-driving cars", BBC, <http://www.bbc.com/news/technology-27587558> (27. Mai 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
25. Smith, A., "Google self-driving car is coming in 2017", The West Side Story, <http://www.thewestsidestory.net/2014/04/28/google-self-driving-car-coming-2017/> (28. Apr 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
26. Pritchard, J., "5 facts about Google's self-driving cars (and why 2017 is still a reality)", Las Vegas Review Journal, <http://www.reviewjournal.com/life/technology/5-facts-about-google-s-self-driving-cars-and-why-2017-still-reality> (28. Apr 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
27. Prada Gomez, L. R., Szybalski, A. T., Thrun, S., Nemec, P., Urmson, C. P., "Transportation-aware physical advertising conversions", Patent US 8630897 B1, <https://www.google.com/patents/US8630897> (11. Jan 2011, abgerufen 27. Jun 2014)
28. Brustein, J., "From Google, Uber Gets Money and Political Muscle", Bloomberg Businessweek (26. Aug 2013)
29. Fehrenbacher, K., "Zappos CEO rethinks urban transportation in Vegas with 100 Tesla Model S cars", Gigaom, <http://gigaom.com/2013/04/03/zappos-ceo-rethinks-urban-transportation-in-vegas-with-100-tesla-model-s-cars/> (3. Apr 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
30. Lardinois, F., "Google Awarded Patent For Free Rides To Advertisers' Locations", TechCrunch, http://techcrunch.com/2014/01/23/google-awarded-patent-for-free-rides-to-advertisers-locations/?utm_source (23. Jan 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
31. "Google Shopping Express", Google Unternehmenswebseite, <https://www.google.com/shopping/express> (abgerufen 27. Juni 2014)
32. "Mumbai eatery delivers pizza using a drone", The Times of India, <http://timesofindia.indiatimes.com/city/mumbai/Mumbai-eatery-delivers-pizza-using-a-drone/articleshow/35440489.cms> (21. Mai 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
33. Pepitone, J., "Domino's tests drone pizza delivery", CNN Money, <http://money.cnn.com/2013/06/04/technology/innovation/dominos-pizza-drone/index.html> (4. Jun 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
34. Gannes, L., "Adventures in Google Self-Driving Cars: Pizza Delivery, Scavenger Hunts, and Avoiding Deer", All Things D, <http://allthingsd.com/20131117/adventures-in-google-self-driving-cars-pizza-delivery-scavenger-hunts-and-avoiding-deer/> (17. Nov 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
35. Grifantini, K., "Robots Take Out the Trash", MIT Technology Review, <http://www.technologyreview.com/view/420608/robots-take-out-the-trash/> (1. Sep 2010, abgerufen 27. Jun 2014)
36. "Timeline Google Street View", Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_Google_Street_View (abgerufen 27. Jun 2014)

37. "Google Glass", Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Google_glass (abgerufen 27. Jun 2014)
38. "Induct Launches Navia, The First 100 Percent Electric, Self-Driving Shuttle In The U.S.", Induct Pressemitteilung, <http://www.prnewswire.com/news-releases/induct-launches-navia-the-first-100-percent-electric-self-driving-shuttle-in-the-us-238980311.html> (6. Jan 2014, abgerufen 28. Jun 2014)
39. "Induct presents world's first fully-electric driverless shuttle: the Navia", Induct Pressemitteilung, <http://induct-technology.com/en/files/2012/12/Navia-press-release.pdf> (6. Dez 2012, abgerufen 27. Jun 2014)
40. Counts, N., "SMART Driverless golf cart provides a glimpse into a future of autonomous vehicles", MIT News, <http://newsoffice.mit.edu/2013/smart-driverless-golf-cart-provides-a-glimpse-into-a-future-of-autonomous-vehicles> (9. Dez 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
41. "AKKA link&go 2.0 electric self-driving concept designed for future cities", Designboom, <http://www.designboom.com/technology/akka-linkgo-2-0-electric-driverless-concept-car-for-the-city-of-the-future-03-12-2014/> (12. Mrz 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
42. Halliday, J., "Driverless cars set to roam Milton Keynes from 2017, says Vince Cable", The Guardian, <http://www.theguardian.com/technology/2013/nov/07/driverless-cars-coming-to-milton-keynes> (7. Nov 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
43. "CityMobil2 selects first seven sites", ITS International, <http://www.itsinternational.com/sections/general/news/citymobil2-selects-first-seven-sites/> (7. Mai 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
44. "The SARTRE Project", <http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx> (abgerufen 27. Jun 2014)
45. "Connected Vehicle Safety Pilot Program", U.S. Department of Transportation / Research and Innovative Technology Administration, Facts Sheet, FHWA-JPO-11-031, 2011, http://www.its.dot.gov/factsheets/pdf/SafetyPilot_final.pdf (2011, abgerufen 27. Jun 2014)
46. "Car 2 Car Communication Consortium", Car2Car Projektwebseite, <http://www.car-to-car.org> (abgerufen 27. Jun 2014)
47. „simTD: Mit Car-to-X-Kommunikation die Zukunft der Verkehrssicherheit und Mobilität gestalten“, simTD Projektwebseite, <http://www.simtd.de/index.dhtml/deDE/index.html> (abgerufen 27. Jun 2014)
48. "Car-to-car communication coming soon to Japan", Nikkei Asia Review, <http://asia.nikkei.com/Tech-Science/Tech/Car-to-car-communication-coming-soon-to-Japan> (18. Mrz 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
49. National Highway Traffic Safety Administration, "Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles", National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Publication 14-13, Washington, USA (30. Mai 2013)
50. "Japanese government aims to implement driverless technology", <http://www.driverless-future.com/?p=272> (27. Jun 2012, abgerufen 27. Jun 2014)
51. Quigley, J.T., "Japanese Prime Minister 'Test Drives' Autonomous Vehicles", The Diplomat, <http://thediplomat.com/2013/11/japanese-prime-minister-test-drives-autonomous-vehicles/> (12. Nov 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
52. "Volvo Car Group initiates world unique Swedish pilot project with self-driving cars on public roads", Volvo Cars Presseveröffentlichung (2. Dez 2013)
53. "Advancing map-enhanced driver assistance systems", ERTICO Projektwebseite, <http://www.ertico.com/adasisforum> (abgerufen 27. Jun 2014)
54. "Action for advanced Driver assistance and Vehicle control systems Implementation, Standardisation, Optimum use of the Road network and Safety", ADVISORS Projektwebseite, <http://www.advisors.iao.fraunhofer.de> (abgerufen 27. Jun 2014)

55. "Netherlands wants to approve large-scale self-driving car test", Automotive IT, <http://www.automotiveit.com/netherlands-wants-to-ok-large-scale-self-driving-car-test/news/id-009301> (20. Jun 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
56. Winner, H., "Mercedes und der Elch: Die perfekte Blamage", <http://www.welt.de/motor/article1280688/Mercedes-und-der-Elch-Die-perfekte-Blamage.html> (21. Okt 2007, abgerufen 27. Juni 2014)
57. Holm, C., „Blanke Nerven an der Donau“, Der Spiegel, <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-15502670.html> (24. Jan 2000, abgerufen 27. Juni 2014)
58. "Toyota Enters Agreement with U.S. Attorney's Office Related to 2009-2010 Recalls"; Toyota Pressemitteilung, <http://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/toyota+agreement+attorneys+southern+district+ny.htm> (19. März 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
59. Elmer, S., "2013 Infiniti JX35 Under NHTSA Investigation for Intelligent Braking Issues", Autoguide, <http://www.autoguide.com/auto-news/2012/07/2013-infiniti-jx35-under-nhtsa-investigation-for-intelligent-braking-issues.html> (30. Jul 2012, abgerufen 27. Juni 2014)

Dirk Heinrichs

Inhaltsverzeichnis

11.1 Einleitung 220

11.2 Autonomes Fahren als Bestandteil von Szenarien zur Stadt von morgen 221

 11.2.1 Regenerative und intelligente Stadt 222

 11.2.2 Hypermobilität 224

 11.2.3 Endlose Stadt 225

 11.2.4 Diskussion 226

11.3 Autonomes Fahren und Einfluss auf die Stadtstruktur 228

 11.3.1 Das autonome Privatfahrzeug 228

 11.3.2 Das autonome Taxi als integrierter Teil des öffentlichen Verkehrs 232

11.4 Wesentliche Treiber für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten 234

11.5 Zusammenfassung und Ausblick 236

 11.5.1 Aspekte in der Diskussion um automatisiertes Fahren aus Sicht der Stadtentwicklung und Stadtplanung 236

Literatur 238

D. Heinrichs (✉)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung, Deutschland
Dirk.Heinrichs@dlr.de

11.1 Einleitung

Mobilität, Verkehr und die physische Gestalt städtischer Räume sind eng miteinander verknüpft [1]. Die Stadtstruktur bildet eine wichtige Grundlage für Mobilitätsentscheidungen von Haushalten und Unternehmen und gibt in entscheidendem Maße vor, welche Formen von Verkehr ermöglicht oder aber auch ausgeschlossen werden. Kompakte Stadtstrukturen mit hoher Dichte und Nutzungsmischung bieten gute Voraussetzungen für kurze Wege, ein leistungsfähiges öffentliches Verkehrsangebot, fördern den Fuß- und Radverkehr und machen die Nutzung des Kraftfahrzeugs im Alltag oft unnötig. Ist die Stadtstruktur hingegen zersiedelt und weist sie eine geringe Dichte auf, werden Fuß- und Radverkehr erschwert, und der motorisierte Individualverkehr wird begünstigt. Die Verfügbarkeit und die Nutzung von bestimmten Verkehrsmitteln üben wiederum einen starken Einfluss auf städtische Strukturen und die notwendigen Infrastrukturen aus. So wurde die Wohn-Suburbanisierung der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts in starkem Maß durch die Verfügbarkeit des Pkw und den Ausbau der Verkehrsinfrastruktur für den motorisierten Individualverkehr gefördert [2].

Erwartungen gehen davon aus, dass mit dem vollautomatisierten Fahren ein ganz neues Verkehrssystem entsteht, das nicht nur neue Möglichkeiten der Verkehrssteuerung mit sich bringt, sondern auch ganz neue Beförderungsangebote generiert, welche die Wahl und Nutzung von zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteloptionen beeinflussen (s. Kap. 12). Die Vorstellung, dass beispielsweise die Zeit im Fahrzeug nicht mit Fahraufgaben verbracht werden muss, sondern andere Aktivitäten zulässt, kann eine vollständige Neubewertung des Faktors Zeit nach sich ziehen (z. B. [28]). Dies kann dazu führen, dass Nutzer für ihre täglichen Wege andere (weiter entfernte) Ziele in Betracht ziehen oder gar ihre Wohnstandortwahl verändern, da lange Pendelwege nicht mehr als nachteilig gesehen werden. Denkt man diese Zusammenhänge konsequent weiter, so wäre letztlich die Auflösung des Faktors Zeit als begrenzende Variable der Stadtentwicklung möglich. Wird also die Verfügbarkeit vollautomatisierter Fahrzeuge das Wechselverhältnis zwischen Mobilität und städtischen Strukturen völlig neu definieren? Zu dieser Frage existieren mit wenigen Ausnahmen [3] noch keine Vorstellungen. Die Visionen zur Integration des autonomen Fahrzeugs in das städtische Verkehrssystem beziehen sich derzeit im Wesentlichen noch auf die Entwicklung der Fahrzeugtechnologie selbst und die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieses Beitrags, die möglichen stadtstrukturellen Entwicklungen unter dem Einfluss eines Verkehrssystems mit autonomen Fahrzeugen auszuloten. Gleichmaßen soll abgeschätzt werden, in welcher Weise politische und ökonomische Rahmenbedingungen diese Entwicklungen beeinflussen können. Die folgenden Fragen stehen dabei im Vordergrund:

- Welche zukünftigen Möglichkeiten eines durch automatisiertes Fahren veränderten bzw. veränderbaren Verkehrssystems sind denkbar?
- Welche Auswirkungen auf Stadtstrukturen, insbesondere auf deren Dichte, Nutzungsmischung und Gestaltung, könnten zukünftig damit verbunden sein?

- Welche Einflussfaktoren sind besonders bedeutsam für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten?
- Welche Aspekte sollten in die Diskussion um das automatisierte Fahren aus Sicht der Stadtentwicklung und Stadtplanung zwingend mit einfließen, aber auch: In welcher Weise sollte die Diskussion um die Entwicklung der Städte das Thema „Automatisierung des Verkehrs“ aufgreifen?

Als Basis für die Untersuchung dieser Fragen wertet der Beitrag verfügbare aktuelle Szenarien zur Stadt der Zukunft aus. Der folgende Abschn. 11.2 stellt die in der Literatur verfügbaren Szenarien bzw. Visionen zur „Stadt von morgen“ und deren Vorstellungen bezüglich einer Integration von Verkehrssystemen mit autonomen Fahrzeugen vor. Auf dieser Grundlage beschreibt er, welche unterschiedlichen zukünftigen Möglichkeiten eines durch automatisiertes Fahren veränderten bzw. veränderbaren Verkehrssystems denkbar sind, in welchen städtischen Strukturen sie sich entwickeln und welche wesentlichen Einflussfaktoren die Autoren für die Entwicklung zugrunde legen.

Aufbauend darauf führt Abschn. 11.3 eine vertiefte Analyse anhand von zwei vom Autor entwickelten idealisierten Szenarien des zukünftig denkbaren „automatisierten Verkehrssystems“ durch. Kern dieser Szenarien ist a) das autonome Privatfahrzeug; b) das autonome Fahrzeug als integrierter Teil des öffentlichen Verkehrs. Auf der Grundlage einer kurzen Charakterisierung beider Szenarien wird analysiert, welche zukünftigen Auswirkungen auf Stadtstrukturen mit dem jeweiligen Szenario verbunden sein könnten.

Abschnitt 11.4 lotet aus, welche Einflussfaktoren besonders bedeutsam für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten sein könnten. Für die vorgestellten Szenarien werden die wesentlichen Treiber benannt.

Der abschließende Abschn. 11.5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse zusammen. Er diskutiert, welche Aspekte in die Diskussion um das automatisierte Fahren aus Sicht der Stadtentwicklung und Stadtplanung zwingend mit einfließen sollten, aber auch, in welcher Weise der Diskurs um die Stadtentwicklung und -planung das autonome Fahren aufgreifen sollte.

11.2 Autonomes Fahren als Bestandteil von Szenarien zur Stadt von morgen

Da automatisiertes Fahren in Städten gegenwärtig noch nicht Realität ist und damit Wirkungen auf Stadtstrukturen derzeit noch nicht beobachtbar sind, bieten Szenarien eine Möglichkeit, denkbare zukünftige Entwicklungen und Zusammenhänge heranzuziehen. Szenarien beschreiben sowohl eine denkbare zukünftige Situation als auch die Entwicklung des Weges, der aus dem Heute in die Zukunft hineinführt [4, 5]. Sie stellen ein anerkanntes Instrument dar, mit dem sich Veränderungen, ihre Treiber sowie die Folgen in einem teilweise unbekannten, unsicheren und sich rasch ändernden Umfeld aufdecken und strukturieren lassen [6].

Für die nachfolgende Darstellung erfolgte eine systematische Auswertung verfügbarer Studien zur Stadt der Zukunft, in denen die Entwicklung der Mobilität bzw. des Verkehrs thematisiert wird. Aus der Gesamtheit der Dokumente wurden Kerndokumente und darin dargestellte Szenarien ausgewählt, die folgende Kriterien erfüllen: eine nachvollziehbare Darstellung eines Zielzustands und eines Entwicklungspfades, die Identifikation von Triebkräften und ihren Interdependenzen, die Behandlung des Themas Mobilität und Darstellung der Wechselwirkungen mit der Siedlungsstruktur. Diese Dokumente wurden im Anschluss zu Typen vergleichbarer Ausprägungen zusammengefasst und dahingehend ausgewertet, welche Formen und Bedeutung automatisierten Fahrens beschrieben werden bzw. welche Veränderungen diese Entwicklung maßgeblich prägen. Die Abgrenzung zueinander erfolgte entlang zweier Unsicherheitsachsen, die für die Auseinandersetzung mit dem automatisierten Fahren besonders relevant sind: die Verfügbarkeit und Integration intelligenter Kommunikationsinfrastruktur (gering bzw. hoch) sowie die Akzeptanz und Nutzung dieser Infrastruktur allgemein bzw. für die Mobilität durch die städtische Bevölkerung (gering bzw. hoch).

Die in den als Kerndokumenten eingestuftten beschriebenen Szenarien lassen sich im Wesentlichen drei Typen zuordnen:

- regenerative und intelligente Stadt,
- hypermobile Stadt,
- endlose Stadt.

Nachfolgend werden die Szenarien näher erläutert.

11.2.1 Regenerative und intelligente Stadt

Eine Reihe von Zukunftsstudien heben die Entwicklung sogenannter regenerativer Städte als einen denkbaren Entwicklungspfad hervor [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Diese Studien sehen für den Zeitraum 2030–2050 technologische Entwicklungen als Kern und Triebkraft städtischer Veränderung, welche den Ressourceneinsatz effizient und umweltverträglich gestalten. Im Mittelpunkt stehen der energetische Umbau von Gebäuden (Solarisierung, Plus-Energiehäuser) und die zunehmende Nutzung dezentral erzeugter Energien aus erneuerbaren Quellen, welche über sogenannte Microgrids bzw. Peer-to-peer-Energiesysteme verteilt und geteilt werden. Unterstützt werden sie durch intelligente Steuerungsmechanismen, die eine Verknüpfung mit anderen Bereichen städtischer Funktionen wie Mobilität ermöglichen. Die Bedeutung von Intelligenz und Information wird in den entsprechenden Studien hervorgehoben. Sie beschreiben den Wandel hin zu einem technologischen Regime, welches nicht mehr durch Technologien für einzelne Sektoren (Energie, Verkehr, Abfall etc.) charakterisiert wird, sondern ein hohes Maß an Integration zwischen den Sektoren gewährleistet.

Im Zuge dieser technologischen Entwicklung vollzieht sich ein Verhaltenswandel der städtischen Bevölkerung [7]. Es wird allgemein ein nachhaltiger Konsum als sehr bewuss-

ter und verantwortlicher Umgang mit Ressourcen angenommen [9]. Erklärt wird dies durch den in Zukunft stärker werdenden Wunsch der konsumierenden Stadtbevölkerung nach Wohlbefinden und Lebensqualität, die sich anders definiert als über ökonomischen Wohlstand. Von der Gesellschaft wird eine energieoptimierte, nachhaltige und zukunftsfähige Mobilität getragen, weil die Mehrheit der Bevölkerung deren Vorteile nicht nur in den Medien präsentiert bekommt, sondern im eigenen Alltag erleben kann.

Der Schlüssel dazu liegt in den dicht bewohnten Metropolregionen, in denen eine vielfältig vernetzte und dennoch einfache und bezahlbare Mobilitätsversorgung gewährleistet ist. Städte werden in diesen Szenarien als Orte charakterisiert, die aufgrund ihrer Dichte eine effiziente Ressourcennutzung ermöglichen. Hinzu kommt die Annahme, dass mit der wachsenden Bedeutung von Städten als ökonomische und soziale Zentren die Entscheidungs- und Handlungspotenziale auf städtischer Ebene in Zukunft zunehmen. Eine Reihe der analysierten Studien verweist darauf, dass Städte wie London bereits heute demonstrieren, dass sich städtische Infrastrukturen umgestalten und dezentrale innovative Ansätze für Energie und Abfall umsetzen lassen, ohne dass nationale Politik erforderlich ist. Städte wandeln sich, getrieben durch Wettbewerb (untereinander) sowie durch Politik und Verwaltung, welche aktiv daran arbeiten, die Standortqualitäten zu verbessern.

Im Zuge des ressourceneffizienten Umbaus der Städte wandeln sich auch die Bedingungen für Mobilität in der regenerativen und intelligenten Stadt. Das Verkehrssystem erfährt eine zunehmende Durchdringung mit Informations- und Kommunikationstechnologie. Darin sehen die analysierten Studien die Grundlage für den Ausbau bedarfsorientierter Mobilitätsmanagementansätze und die Verknüpfung von Verkehrsangeboten zu einem künftigen flexiblen, multimodalen Verkehrssystem (s. Kap. 9). Der ÖPNV als Rückgrat der städtischen Mobilität wird weiter ausgebaut und laufend modernisiert, in integrierter Planung im Umweltverbund mit Fuß- und Fahrradwegen, deren Anteil am Straßenraum zunimmt. Ergänzend dazu stehen den Bürgerinnen und Bürgern individuell nutzbare Verkehrsmittel (Fahrräder, e-Bikes, Elektroautos, Elektrotransporter) zur Verfügung, und zwar zeitlich dann und örtlich dort, wann und wo der individuelle Bedarf besteht (*mobility on demand*). Diese „Sharing“-Angebote nach dem Prinzip „nutzen statt besitzen“ werden von verschiedenen Anbietern auf- und ausgebaut und helfen, die derzeit vom motorisierten Individualverkehr beanspruchte Fläche im öffentlichen Raum stark zu verringern. Ein persönlicher, mobiler und elektronischer Mobilitätsassistent ermöglicht es, alle für die tägliche Mobilität zur Verfügung stehenden Handlungsalternativen abzuwägen und situationsspezifisch optimale Varianten auszuwählen.

Die Weiterentwicklung elektronischer Assistenzsysteme für Pkw wird in den Studien im Zusammenhang mit der Entwicklung effizienterer neuer Antriebsformen thematisiert. Es wird davon ausgegangen, dass das eigene Fahrzeug auch in Zukunft seine Bedeutung behalten wird [11]. Verschiedene Studien erwarten die Präsenz von Fahrzeugen im Zeitraum 2030–2050, in denen fest eingebaute elektronische Assistenzsysteme für teilautonome Nutzungen zur Standardausrüstung gehören. Beispielsweise auf Autobahnen mit hohem Transitaufkommen oder Pendlerstrecken ermöglichen sie die Fahrt mit dem Autopiloten, womit eine Optimierung des Verkehrsflusses erreicht wird. Sichergestellt wird dies durch

eine hohe Vernetzung und Kommunikation zwischen Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur. Diese Entwicklung wird flankiert durch neue Gesetzgebung bezüglich Zulassung, Haftungsrecht und Versicherungswesen sowie durch ein Akzeptanz schaffendes Konzept des Staates zu den Themen Datenmanagement und Standardisierung von Daten (*Open Source*, Schnittstellenkompatibilität, Datenschutz und Sicherheit).

Im Zuge der Veränderungen des Mobilitätsangebots beschreiben die untersuchten Studien auch einen Wandel der räumlichen Struktur der Städte. Die Verknüpfung von Verkehrsangeboten, so die Autoren, verstärkt die bereits heute zu beobachtende Herausbildung von sogenannten Mobilitätsknoten. Es wird davon ausgegangen, dass sich in Zukunft Stadtquartiere um diese Knoten herum in einer polyzentrischen Stadtstruktur organisieren. Der Flächenverbrauch für Stellflächen im Stadtraum hat sich deutlich reduziert. Die Gründe hierfür sind eine dynamische Verteilung der Fahrzeuge in Stadtquartieren sowie automatisierte „Parkregale“, die ein platzsparendes Abstellen von Fahrzeugen sicherstellen.

11.2.2 Hypermobile Stadt

Die hypermobile Stadt als ein denkbarer Entwicklungspfad wird insbesondere in einer Studie des Foresight Directorate des UK Office of Science and Technology thematisiert [7]. Beschrieben wird die Entwicklung einer Gesellschaft bis in das Jahr 2055, in der kontinuierliche Information, Konsum und Wettbewerb die Norm sind [7].

Auch dieses Szenario geht, wie im Fall der regenerativen Stadt, davon aus, dass durch technologische Entwicklung und Innovation derzeit noch existierende Barrieren zum individuellen Nutzen einer Mehrheit der Gesellschaft überwunden werden, aber mit einem weiterhin sehr hohen Bedarf an Ressourcen und den entsprechenden Umweltfolgen. Ein wesentliches Element und Treiber für die Entwicklung ist die Akzeptanz der Entwicklung elektronischer und digitaler Infrastruktur, wie beispielsweise die Nutzung von Kameras für den virtuellen Austausch oder von persönlichen Informationsassistenten. Ist diese Akzeptanz derzeit noch gering, so nimmt sie aufgrund ihrer Vorteile für Lebensstil und Handel in den kommenden Jahrzehnten deutlich zu. Menschen in der Stadt der Zukunft sind *always on*, ob zuhause oder am Arbeitsplatz. Dazu nutzen sie personalisierte, mit Verschlüsselungstechnologie ausgestattete Assistenten, mit deren Hilfe sie sich umfassend organisieren und ihren Alltag planen. Auch wenn in dem Szenario die Probleme und Vorbehalte bezüglich Datenschutz und Privatsphäre sehr deutlich thematisiert werden, so werden diese letztlich aufgrund des Wertes der elektronischen Assistenten für die Nutzer an die Seite gedrängt.

Der Staat und der Privatsektor haben auf dem Weg in das Jahr 2055 miteinander kooperiert, um die erforderlichen Technologien zu entwickeln. Zu den treibenden Interventionen gehören die starke Förderung von nutzerbezogener Informations- und Kommunikationstechnologie (persönliche Assistenzsysteme, die Vereinheitlichung von Kommunikationsstandards und GPS) sowie Technologieentwicklung (Verschlüsselungstechnologien, Sensoren, Ortung). Eine wichtige Voraussetzung auf dem Weg sind starke Bemühungen um die Datensicherheit auf europäischer Ebene.

Die Mobilität im Zieljahr dieses Szenarios (2055) wird als ausgesprochen vernetzt beschrieben. Die Autoren zeichnen eine Entwicklung, in der die Mobilitätsnachfrage weiter ansteigt. Die starke Ausrichtung auf Informations- und Kommunikationstechnologie hat in diesem Szenario auch die Automatisierung der Mobilität und des Verkehrs vorangetrieben, nicht zuletzt um die Verkehrsflüsse zu optimieren und Staus zu mindern. In den Städten ersetzen integrierte Massentaxi-Systeme weitgehend den gewöhnlichen öffentlichen Verkehr. Diese übernehmen das effiziente Abholen und Verteilen von Fahrgästen in Zustiegszonen. Die dafür eingesetzten lokalen Beförderungsfahrzeuge operieren in zugewiesenen Stadtgebieten und werden von Nutzern mithilfe ihres persönlichen Assistenten angefordert. Das Netzwerk kalkuliert die effizienteste Route, auch für das Abholen und Absetzen von mehreren Passagieren, und berechnet den Fahrpreis. Dieses auch als „Schwarm“ bezeichnete Netzwerk kann große Datenmengen über die Verkehrslage und Nachfragepositionen verarbeiten. Die Fahrzeuge können ihre Route anpassen. Passagiere können jedes Fahrzeug nutzen, anstatt auf eine bestimmte Linie warten zu müssen.

Autonome Fahrzeuge verkehren auf Autobahnen für Langstrecken auf einer eigens für sie reservierten *guided lane*, einige auch für Anwendungen über Nacht. Menschen kaufen größere Autos und fahren weitere Strecken. Diese Fahrzeuge sind mit einer *on-board driverless unit* ausgestattet, welche mit automatisierten Systemen entlang der Autobahnen sowie wesentlicher Pendler Routen kommunizieren. In dieser Form entstehen Züge automatisch kontrollierter Fahrzeuge, welche mit hoher Geschwindigkeit eng zusammen fahren.

Die Entwicklung städtischer Strukturen wird in diesem Szenario differenziert beschrieben. Einerseits entstehen stark verdichtete Innenstädte, andererseits setzt sich das Wachstum suburbaner Gebiete geringer Dichte fort. Während vor allem jüngere Menschen die urbanen Zentren als Lebensort bevorzugen, entscheidet sich eine wachsende Zahl einkommensstarker Haushalte für einen Umzug an die Ränder der Städte oder in ländliche Gebiete. Trotz steigender Entfernung zu den in der Innenstadt gelegenen Arbeitsplätzen können sie weiter am intensiven Arbeitsleben teilnehmen, entweder mithilfe von Telepräsenz unter Nutzung noch leistungsfähigerer Kommunikationsinstrumente oder durch die bequeme Nutzung des automatisierten Fahrzeugs. Gleichzeitig verschafft sich diese Bevölkerungsgruppe durch das suburbane Wohnen das Gefühl und die Möglichkeit, sich von dem zunehmend anstrengenden und fordernden Arbeitsleben in der hypermobilen Welt zu erholen.

11.2.3 Endlose Stadt

Während die Szenarien der regenerativen und der hypermobilen Stadt die technologische Entwicklung als einen Motor für Veränderungen von städtischen Lebensweisen, Mobilität und städtischen Strukturen in den Vordergrund stellen, thematisieren andere Szenarien ein konträres Bild [12].

Die hier zugrunde liegenden Annahmen sind, dass sich technologische Innovationen nicht in dem umfassenden Maße durchsetzen, insbesondere aufgrund der hohen Kosten für

erforderliche Infrastrukturen. Technologische Entwicklung findet zwar statt, ist aber vornehmlich auf Effizienzgewinne einzelner Bereiche (Verbrennungsmotoren, Solarenergie) beschränkt. Die Steuerungsmöglichkeiten des Staates werden als begrenzt gesehen. Auch ein Verhaltenswandel, wie in den vorherigen Entwicklungen skizziert, wird nicht sichtbar.

Hinsichtlich Mobilität und Raumstruktur sehen die Autoren dieses Szenarios ein auto-dominiertes Modell weiterhin deutlich ausgeprägt. Im öffentlichen Verkehr werden sich in vielen Städten aufgrund staatlich begrenzter Kapazitäten zur Weiterentwicklung des öffentlichen Verkehrssystems sogenannte informelle Paratransit-Dienste weiterentwickeln. Der Vernetzungsgrad mit vorhandenen Angeboten bleibt gering. Die Möglichkeit eines autonomen Verkehrssystems wird nicht thematisiert. Räumlich sind Städte durch eine niedrige Dichte und fragmentierte Siedlungsstrukturen gekennzeichnet. Diesbezüglich schreiben die Autoren einen derzeit global zu beobachtenden Trend fort [13].

11.2.4 Diskussion

Die hier dargestellte Auswahl und Analyse zeigt, dass Szenarien die Möglichkeit eines durch automatisiertes Fahren veränderten bzw. veränderbaren Verkehrssystems teilweise thematisieren. Automatisierte Lösungen werden insbesondere in Szenarien mit hoher Durchdringung und Verknüpfung innovativer Kommunikations- und Ortungstechnologie formuliert (regenerative und hypermobile Stadt). Automatisiertes Fahren im städtischen Kontext wird dabei als Beitrag im öffentlichen Verkehr erwartet. Die Szenarien beschreiben beispielsweise den Einsatz von stapel- und programmierbaren Kleinstfahrzeugen oder ein integriertes Massentaxi-System. Das automatisierte Privatfahrzeug findet im Zuge des Langstreckenverkehrs auf Autobahnen Erwähnung (s. Tab. 11.1).

Mit Blick auf die Auswirkungen durch automatisiertes Fahren auf die Stadtstruktur beschreiben die unterschiedlichen Szenarien zunächst den Zusammenhang mit einem allgemeinen Wandel der Rahmenbedingungen. Das Szenario der regenerativen Stadt zeigt sich in einer zunehmenden Dichte von Bevölkerung und Funktionen in Städten. Andere Szenarien (hypermobile und endlose Stadt) gehen von einer Fortführung derzeit global zu beobachtender Suburbanisierungstendenzen als Folge individueller Präferenzen einkommensstarker Haushalte oder aufgrund von Abdrängungsprozessen einkommensschwächerer Haushalte aus. Als sichtbare Veränderung der Stadtstruktur durch ein Verkehrssystem mit Elementen des automatisierten Fahrens wird in verschiedenen Szenarien die Entstehung sogenannter Mobilitätshubs oder -knoten beschrieben. Im Szenario der regenerativen und intelligenten Stadt wird die Vorstellung der Vernetzung konsequent auf den Stadtraum übertragen. Multimodale Verkehrsknoten ermöglichen eine physische Vernetzung und einen einfachen Umstieg zwischen verschiedenen Modi wie beispielsweise vom (Elektro-) Auto auf öffentliche Verkehrsmittel. Das Szenario geht noch einen Schritt weiter, indem es über die Bündelung unterschiedlicher Mobilitätsangebote auch von einer Änderung sonstiger Nutzungen ausgeht. Es beschreibt Stadtquartiere, die sich rund um Mobilitätsknoten und Versorgungsdienstleistungszentren organisieren und bei denen automatisierte Fahr-

Tab. 11.1 Die Szenarien im Überblick

Szenario	Ausprägung autonomen Fahrens	Stadtstruktur	Treiber
Regenerative Stadt	<ul style="list-style-type: none"> flexibles, multimodales und vernetztes öffentliches Verkehrssystem als Rückgrat der städtischen Mobilität (teil)-autonome Pkw (Autopilot) auf Autobahnen 	<ul style="list-style-type: none"> Herausbildung von intermodalen Mobilitätsknoten Reduktion des Flächenverbrauchs für Stellflächen im Stadtraum durch neue Parksyste-me 	<ul style="list-style-type: none"> technologische Entwicklung (im Energiesystem) bewusster und verantwortlicher Umgang mit Ressourcen Gesetzgebung und Akzeptanzförderung durch den Staat
Hypermobile Stadt	<ul style="list-style-type: none"> hoch integrierte (autonome) Massentaxi-Systeme autonome Pkw auf Autobahnen mit hohem Transitaufkommen oder Pendlerstrecken auf reservierten <i>guided lanes</i> 	<ul style="list-style-type: none"> stark verdichtete Innenstädte Wachstum suburbaner Gebiete geringer Dichte 	<ul style="list-style-type: none"> zunehmende Akzeptanz von Informations- und Kommunikationstechnologien aufgrund ihrer Vorteile für Lebensstil und Handel Kooperation von Staat und Privatsektor, um erforderliche IKT-Technologien zu entwickeln
Endlose Stadt	<ul style="list-style-type: none"> autodominantes Modell vorherrschend geringe Integration des öffentlichen Verkehrs (hoher Anteil informeller <i>Paratransit</i>-Angebote) keine nennenswerten Entwicklungen hin zu automatisiertem Fahren 	<ul style="list-style-type: none"> Wachstum suburbaner Gebiete generelle Abnahme der Siedlungsdichte 	<ul style="list-style-type: none"> fehlende Steuerungsfähigkeit des Staates technologische Entwicklung beschränkt auf Effizienzgewinne einzelner Bereiche

Eigene Darstellung, basierend auf [7–12]

zeuge als Teil der öffentlichen Fahrzeugflotte einbezogen sind. Auch das Parken und seine Verknüpfung mit dem Raum werden in nahezu allen Szenarien in sehr unterschiedlicher Weise thematisiert. Das Szenario der regenerativen Stadt beschreibt den Rückgang des Flächenbedarfs im Zusammenhang mit dem sinkenden Anteil privater Pkw und einem dezentralen Parkraummanagement. In der intelligenten Stadt der Zukunft hat sich eine Verknüpfung der Nutzung des eigenen Pkws mit dem öffentlichen Verkehr durchgesetzt, und es entstehen neue P+R-Flächen an Mobilitätsknoten.

Insbesondere die Beschreibungen zur intelligenten und regenerativen Stadt sind dabei geprägt durch die Grundüberzeugung, dass die Technologie derzeit existierende bzw. ab-

sehbare Probleme (Ressourcenknappheit, Umweltwandel) überwinden wird. Die zentrale Bedeutung technologischer Entwicklung wird auch im Szenario der endlosen Stadt bestätigt, allerdings aus der umgekehrten Perspektive. Dort wird das Fehlen von Innovation als Erklärung für eine Reihe negativer Entwicklungen interpretiert. Dieses Szenario steht in gewissem Sinne für eine denkbare Entwicklung in Städten des globalen Südens, in denen die Steuerungskapazitäten des Staates als vergleichsweise gering eingestuft werden.

Eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema Daten erfolgt lediglich im Szenario der hypermobilen Stadt. Probleme des Datenschutzes und der Sicherheit gelten dort im Zielzeitraum um 2050 als gesellschaftlich akzeptiert, da die individuellen Vorteile der Informations- und Kommunikationslösungen für die Teilhabe in sozialen Netzwerken und im Arbeitsleben die Nachteile aus Sicht der Bevölkerung überwiegen.

11.3 Autonomes Fahren und Einfluss auf die Stadtstruktur

Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Szenarien entwickeln eine Vorstellung davon, in welcher Form das automatisierte Fahren in der Stadt der Zukunft als ein Bestandteil des Verkehrssystems denkbar ist. Im Folgenden wird ein näherer Blick auf die möglichen Veränderungen der Stadtstruktur gelegt, die sich in dem Zusammenhang ergeben: Wie ändern sich Verteilung von Nutzungen, Dichte und Gestaltung städtischer Räume unter dem Einfluss autonomen Fahrens?

Die genannten Szenarien zeigen, dass voneinander grundsätzlich unterscheidbare Optionen denkbar sind. Zum einen beschreiben sie die Entwicklung eines autonomen Privatfahrzeugs, welches je nach Szenario „bordautonom“ durch einen Autopiloten gesteuert wird oder durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation in den Verkehrsfluss eingebunden ist. Zum anderen sehen die Szenarien das autonome Fahren als integrierten Teil des öffentlichen Verkehrsangebots. Es ist davon auszugehen, dass die Wirkungen auf die Stadtstruktur abhängig von der Ausprägung des autonomen Verkehrssystems sehr unterschiedlich sein dürften. Daher werden nachfolgend beide Ausprägungen einzeln behandelt.

11.3.1 Das autonome Privatfahrzeug

Diese Ausprägung beschreibt im Kern die Übertragung von Fahraufgaben auf Automaten im unimodalen Individualverkehr. Sie greift Aspekte der in Kap. 2 dargestellten Anwendungsfälle AutobahnpiLOT, Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer und Valet-Parken auf.

Dieser Fall geht davon aus, dass die zukünftige Nutzung mit der heutigen Pkw-Nutzung weitgehend übereinstimmt. Abgesehen von den veränderten Eigenschaften der eingesetzten Technologie werden keine Veränderungen angenommen. Nach wie vor ist der Pkw in individuellem Besitz. Es werden keine Annahmen zu Änderungen des Modalwahl- und Zielwahlverhaltens getroffen. Allerdings gibt es Änderungen gegenüber der derzeitigen Nutzung des Fahrzeugs. Zum einen ermöglicht autonomes Fahren andere Aktivitäten wäh-

rend der Fahrt: Vormalige Fahrer können nun – beispielsweise – auf ihrem Laptop arbeiten, essen, ein Buch lesen, einen Film anschauen oder Freunde anrufen [14]. Zum anderen verändern sich die Zugangssituation und die Abgangssituation. Während der Pkw heutzutage entweder direkt vom Wohnort zum Zielort gefahren wird bzw. der Nutzer vor Fahrtantritt das Fahrzeug aufsucht und nach Fahrtende die Strecke vom Parkplatz/-ort zum Ziel zurücklegt, wird unter dem Einfluss des autonomen Fahrens dieser Zu- und Abgangsweg durch einen Vor- bzw. Nachlauf des Fahrzeugs ersetzt. Der Fahrroboter manövriert das Fahrzeug von der ursprünglichen Parkposition zum Ort des Halters/Nutzers und nach Erreichen des Zielorts zu einer zugewiesenen Parkposition.

Die denkbaren Wirkungen bzw. Veränderungen durch den Einsatz eines autonomen Fahrzeugs auf die Stadtstruktur umfassen zum einen den benötigten Parkraum für Fahrzeuge am Wohnort sowie am Zielort. Zum anderen wird eine Veränderung der Attraktivität von Standorten als Wohnstandort von Haushalten erwartet, einen Attraktivitätswandel wird es aber auch bei Standorten geben, die Ziele für alltägliche Aktivitäten wie Einkaufen oder Freizeit sind. Hinzu kommt, dass sich mit dem Einsatz des autonomen Fahrzeugs der Flächenbedarf für den fließenden Verkehr verändert. Auf diese drei Aspekte wird nachfolgend näher eingegangen.

11.3.1.1 Veränderung des benötigten Parkraums

Die zu erwartenden Veränderungen des Parkraumbedarfs für Fahrzeuge am Wohnort sind insgesamt als gering einzuschätzen, unterscheiden sich allerdings abhängig von den Eigenschaften der Siedlungsstruktur. In Einfamilienhaus-Wohnsiedlungen, in denen sich der Stellplatz auf dem Wohngrundstück befindet, ist keine Veränderung zu erwarten. Hier wird der verfügbare Parkplatz lediglich durch ein anderes (autonomes) Fahrzeug belegt. In Gebieten hoher Dichte, wie beispielsweise in innerstädtischen Bereichen, ist von der Entwicklung bzw. Entstehung von wohnquartiersbezogenen Parkzonen oder Sammelgaragen auszugehen. Denn nur so kann sichergestellt werden, dass das autonom parkende Fahrzeug auch einen Platz im definierten Einzugsbereich des Wohnorts findet.

Weiterreichende Wirkungen auf den Parkraum durch den Einsatz autonomer Fahrzeuge sind am Zielort eines Weges denkbar, der nicht der Wohnort des Nutzers ist. Dies betrifft beispielsweise Einkaufswege, Wege zum Zweck der Erholung oder auch Arbeitswege. Autonome Fahrzeuge wären in der Lage, die Passagiere am Zielort abzusetzen und sich dann auf einem zugewiesenen Parkplatz oder auch in einer Sammelgarage eigenständig zu parken. Auch hier ist davon auszugehen, dass die entsprechenden Parkraumkapazitäten bereitgestellt werden, die dem Fahrzeug das Auffinden eines Parkplatzes sicher und verlässlich ermöglichen. Diese Anwendung autonomen Fahrens, bei der das Fahrzeug den Nutzer am Zielort absetzt und sich anschließend autonom parkt, dürfte einerseits mit einer höheren Akzeptanz bei Nutzern einhergehen, bestimmte Ziele mit dem Pkw aufzusuchen. Andererseits dürften sich erhebliche Effekte bezüglich der Bereitstellung und Bewirtschaftung von Parkraum ergeben. Insbesondere in Gebieten hoher Nutzungsdichte ist davon auszugehen, dass eine Bündelung des Parkraumangebots in Form von Sammelgaragen erfolgt.

Die Möglichkeit zur Einsparung von Fläche wird als ein wesentliches Argument für den Einsatz automatischer Parksyste me genannt, wobei die günstige Flächenausnutzung in erster Linie durch den Ersatz von Rampen und Fahrgassen durch Fördervorrichtungen sowie die Verringerung der Geschosshöhen erreicht wird, aber auch durch das dichte Einparken [14, 15]. Bei Einsatz des Parkroboters gehen die Entwickler von bis zu 60 Prozent mehr Parkplätzen auf gleicher Fläche aus [16].

Die effizientere Nutzung von Flächen für das Parken ist insbesondere aus Kostengesichtspunkten attraktiv [16, 17, 18]. Die für ein Bauvorhaben zu errichtenden Stellplätze haben einen hohen Flächenbedarf und stellen, vor allem wenn die Stellplätze nicht ebenerdig errichtet werden, einen nicht unerheblichen Anteil an den Kosten der Gesamtinvestition dar. Es gibt bereits erste Projekte, die das Parken in Parkhäusern mit autonomen Fahrzeugen testen [19, 20]. Der Fahrer übergibt das Fahrzeug am Eingang des Parkhauses. Die Parkfunktion wird mithilfe einer Smartphone-App aktiviert. Über WLAN erhält das Auto die Routendaten vom Zentralrechner im Parkhaus zum nächsten freien Parkplatz und fährt autonom dorthin. Als ein Vorbild können hierfür bereits heute existierende automatische Parksyste me dienen, bei denen abgesehen von der Ein- und Ausfahrt in einer Übergabekabine alle notwendigen Fahrzeugbewegungen automatisch über Fördervorrichtungen bzw. Verschiebeeinrichtungen realisiert werden, oder mit eigens entwickelten Parkrobotern, wie sie beispielsweise am Flughafen Düsseldorf bereits im Einsatz sind [16].

Wie erwähnt, dürfte sich die Restrukturierung und mögliche Konzentration von Parkflächen nicht flächendeckend durchsetzen, sondern vorrangig auf Gebiete beschränken, die als Ziel besonders attraktiv sind und deren Kosten für die Erstellung erforderlicher Parkflächen und damit die Anreize für platzsparende Lösungen besonders hoch sind (Baulandpreise, Flächenknappheit und damit Bedarf an mehrgeschossigen Lösungen). Hierzu zählen hoch verdichtete innerstädtische Dienstleistungs- und Einkaufszentren oder auch neue Gewerbegebiete mit hoher Zahl an Beschäftigten. Hinzu kommen Mobilitätsknoten – oft auch mit dem englischen Begriff *Hub* bezeichnet – wie Flughäfen oder Bahnhöfe, an denen neben den vorherigen Kriterien auch sichere Lösungen für das längere Einstellen von Fahrzeugen gefordert sind. Inwieweit sich im Zuge der Automatisierung die Kosten für das Parken insgesamt verändern dürften, ist nicht abzuschätzen. Einerseits kann das Absetzen von Passagieren am Zielort und anschließendes Parken an anderer Stelle im Stadtgebiet (mit etwas niedrigerem Nutzungsdruck und damit günstiger) Kosten sparen [21, 22]). Andererseits entstehen mit dem Umbau des Parkraumangebots für autonomes Fahren wiederum Kosten.

11.3.1.2 Veränderung der Attraktivität von (Wohn-)Standorten

Mit der Verfügbarkeit autonomer Fahrzeuge sind auch Effekte auf die Art der Flächennutzung denkbar. Einige Studien weisen auf den Zusammenhang einer steigenden Attraktivität von Wohngebieten am Stadtrand hin [2, 22, 23]. Nach dieser Argumentation kann die Verfügbarkeit eines autonomen Fahrzeugs dazu führen, dass Haushalte im Grünen gelegene, kostengünstigere, aber weiter vom Zentrum der Stadt entfernt gelegene Standorte wählen, da das autonome Fahrzeug die Standortnachteile (größere Entfernung) kompen-

siert. Eine Folge wäre die Entstehung von neuen Siedlungsgebieten vergleichsweise geringer Dichte und geringer Nutzungsmischung analog zur Suburbanisierung in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts. Dort haben Motorisierung, Infrastruktur und die planerisch-politischen Leitbilder der Nutzungstrennung und der aufgelockerten Stadt sowie die Entscheidung von Haushalten für die Ansiedlung im Grünen eine bis heute prägende Siedlungsstruktur geschaffen [24].

Generell ist bekannt, dass die Wohnstandortwahl von Berufstätigen durch Faktoren wie Wohn- und Wohnumfeldqualität weitaus stärker beeinflusst wird als durch den Wunsch nach Nähe zum Arbeitsplatz [25]. Erkennbar wird dies durch eine vergleichsweise hohe Bedeutung des Arbeitspendelns. Etwa 60 Prozent aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland, das sind rund 17 Millionen Personen, arbeiten nicht in der Gemeinde, in der sie wohnen. Um zum Arbeitsort zu gelangen, benötigen Beschäftigte durchschnittlich ca. eine halbe Stunde pro Weg. Dabei dominiert die Pkw-Nutzung, indem etwa 66 Prozent der Wege mit dem Auto zurückgelegt werden [26], in den USA sind es sogar 86 Prozent [27]. Auf Basis von Datensätzen zur Erwerbstätigkeit und Beschäftigung sowie zu regionalen Berufsverflechtungen haben Guth et al. [25] herausgefunden, dass in den Agglomerationsräumen in Deutschland der Anteil der gemeindeübergreifenden Berufspendelwege und die zurückgelegten Distanzen in den letzten Jahrzehnten angestiegen sind.

Autonomes Fahren könnte diesen Trend und die Bereitschaft zur Inkaufnahme längerer Pendel-Arbeitswege weiter fördern. Zum einen wird angenommen, dass sich mit dem autonomen Fahren eine Steigerung des Fahrkomforts verbindet (z. B. [14]). Die Fahrzeit muss nicht mehr für die aufmerksame und verantwortungsvolle Fahrzeugführung aufgewendet werden, sondern kann anderen Aktivitäten dienen. Mobilität wird nicht notwendigerweise als Zwang oder Zeitverlust empfunden. Des Weiteren lassen sich Fahrzeiten verkürzen. Im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren bestehen hohe Erwartungen an eine allgemein effizientere Abwicklung des fließenden und ruhenden Verkehrs [2, 22, 28]. Autonome Fahrzeuge können ihre Fahrweise miteinander harmonisieren, beispielsweise bei Beschleunigungs- und Bremsvorgängen, und damit Wegezeiten reduzieren. Ebenso werden nahezu keine Verzögerungen mehr an Kreuzungen vorausgesagt [14]. Auch beim Parksuchverkehr werden deutliche Reduzierungen des Zeitbedarfs erwartet, bedingt durch das Absetzen von Passagieren. Die Fahrt mit dem autonomen Fahrzeug kann insgesamt prognostizierbarer und zeitlich verlässlicher geplant werden. Dies ergibt sich aus nahezu konstanten Geschwindigkeiten und einer verlässlichen und vorhersagbare Route vom Ausgangspunkt zum Ziel.

Verbesserter Fahrkomfort, verringerte Wegezeiten und höhere Verlässlichkeit von Reisezeiten sind relevante Faktoren für die Abwägung von Haushalten, weiter entfernte Arbeitsplätze oder sonstige Ziele wie Versorgungs- und Bildungseinrichtungen zugunsten anderer Kriterien eines Wohnstandorts wie die Bezahlbarkeit des Wohnraums oder die landschaftliche Attraktivität des Umfeldes. Besonders für Berufspendler dürfte sich mit der Verfügbarkeit eines autonomen Fahrzeugs und der prognostizierten Effekte die Entscheidungsgrundlage verändern. Insbesondere Wegezeiten stellen eine hohe Zusatzbelastung für

Pendler dar [29]. Dies wird dort noch verstärkt, wo die Zeitdauer und damit das Erreichen des Ziels schwer kalkulierbar werden. Psychologische Studien [30] zeigen, dass Zeitverluste, die der Verkehrsteilnehmer nicht selbst kontrollieren kann – beispielsweise durch Stau – in besonders hohem Maße für Stress verantwortlich sind.

11.3.1.3 Flächenbedarf für den fließenden Verkehr

Die genannten Vorteile des autonomen Fahrens lassen auch erwarten, dass Kapazitäten von Verkehrswegen frei werden. Aufeinander abgestimmte Beschleunigungs- und Bremsvorgänge und die dichtere Fahrzeugfolge (das sogenannte *Platooning*) ermöglichen eine Reduzierung des Straßenraums zur Abwicklung des Fahrvorgangs [30]. Dadurch wird eine deutlich höhere Fahrzeugdichte bezogen auf die Fläche des Straßenraums erwartet [30, 31], wobei unterschiedliche Aussagen zum Umfang dieser Kapazitätssteigerung existieren. So geht Fernandez von bis zu 500 Prozent aus [31]. Brownell schätzt gut 250 Prozent für Autobahnen und etwa 180 Prozent für innerstädtische Straßen [32]. Dies bedeutet, dass die für den fließenden Verkehr erforderliche Fläche reduziert werden könnte, beispielsweise durch die Reduktion von Fahrspuren. Auch die Breite von Fahrstreifen könnte, aufgrund des veränderten Fahrzeugverhaltens autonom fahrender Fahrzeuge, gegenüber gegenwärtigen Maßen reduziert werden (s. Kap. 16). Aufgrund der Reduzierung des Flächenbedarfs durch den fließenden Verkehr könnten andere Nutzungen gefördert werden, wie beispielsweise Fahrstreifen für Fahrräder oder Fußwege. Allerdings weisen verschiedene Autoren darauf hin, dass diese Effekte erst bei vollständiger Automatisierung zum Tragen kommen [22].

Die Verdichtung des fließenden Verkehrs könnte aber auch in anderer Weise Auswirkungen auf Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer nach sich ziehen. So dürfte die Trennungswirkung zunehmen und das Queren von Fahrspuren unter Bedingungen eines dicht fließenden Verkehrs erschwert werden. Um die Vorteile des autonomen Fahrens für den Verkehrsfluss zu gewährleisten und gleichzeitig die „Durchlässigkeit“ für den Fuß- und Radverkehr sicherzustellen, wäre die Anlage von kreuzungsfreien Querungen wie Über- oder Unterführungen eine notwendige Konsequenz.

11.3.2 Das autonome Taxi als integrierter Teil des öffentlichen Verkehrs

Eine zweite Entwicklung, die weitaus prominenter in den dargestellten Szenarien thematisiert wird, ist die Entstehung eines neuen Modells städtischer Mobilität in Form autonomer Taxifloten. Sie greift Aspekte des in Kap. 2 beschriebenen Anwendungsfalls „Vehicle-on-Demand“ auf. In einem solchen System operieren kostengünstige autonome Taxis nicht auf festen Routen und nach starren Fahrplänen, sondern bedarfsorientiert und flexibel. Sie sind im permanenten Fahrbetrieb und verkehren in einem stadtweiten, dichten Netz von Stationen. Die Funktionsweise ähnelt dem Anruf-Sammeltaxi. Das Stadtgebiet ist in Zellen aufgeteilt. Zu jeder Zelle gehört eine oder eine Reihe von zentralen Aus- und Zustiegsstationen, sogenannte *central transit points*. Denkbar ist, dass Taxis mit dem schienen-

gebundenen öffentlichen Verkehrsangebot (ÖV) verknüpft sind bzw. kombiniert werden können. Die Taxis übernehmen die Zubringer- bzw. Feinverteilungsfunktionen zu den Stationen des schienenengebundenen ÖV und nehmen dort Fahrgäste auf, während der leistungsfähigere und möglicherweise schnellere ÖV die langen Streckenabschnitte übernimmt. Der Einsatz eines automatisierten Taxi-Netzwerks ist als Konzept bereits beschrieben und modelliert [32, 33, 34]). Es könnte zu einem grundlegenden Wandel des öffentlichen Nahverkehrs führen und das Problem der letzten Meile von Hochgeschwindigkeitsbahnen lösen [23]. Es beinhaltet den Wegfall klassischer Bus- und Tram-Haltestationen. Der Betrieb der Taxis könnte öffentlich oder privat erfolgen.

11.3.2.1 Verkehrs- und Parkflächen des öffentlichen Raums

Die Auswirkungen eines öffentlichen Verkehrssystems mit autonomen Fahrzeugen auf Stadtstrukturen dürften sehr weitreichend sein. Der Einsatz autonomer Fahrzeuge könnte die Anzahl von Parkplätzen in Stadtzentren deutlich reduzieren. Denn nach Absetzen von Passagieren müsste sich das Fahrzeug nicht zu einer entfernten Station zum Parken navigieren, sondern würde einfach zum nächsten Passagier weiterfahren. Damit sind mehr Fahrzeuge im kontinuierlichen Betrieb, und der Stellplatzbedarf sinkt. Erforderlich ist allerdings die Einrichtung dezentraler Depots für Reinigung, Wartung, Tanken/Laden oder Reparatur der eingesetzten Fahrzeuge.

Der permanent verfügbare Einsatz einer solchen Taxiflotte dürfte *car sharing* und möglicherweise auch dynamisches *ride sharing* erhöhen, da es spontanes und minuten- bzw. entfernungsgenaues Mieten eines Fahrzeugs für die Tür-zu-Tür-Fahrt ermöglicht [14]. Es könnte als eine konsequente Weiterentwicklung bereits heute existierender flexibler Carsharing-Geschäftsmodelle gesehen werden, welche diese Eigenschaften bereits besitzen (Car2go, City Car Club, DriveNow, Zipcar). Vor diesem Hintergrund könnte davon ausgegangen werden, dass ein solches System Fahrzeugbesitz und -nutzung spürbar verändern wird (s. Kap. 9). Auch eine Steigerung des Besetzungsgrades der Pkw-Nutzung ist denkbar [22].

Eine Folge könnte ein Rückgang des Pkw-Besitzes in Haushalten sein, die im Einzugsgebiet eines solchen *Mobility-on-demand*-Angebots leben. So könnten sich US-Amerikaner derzeit vorstellen, ihren Zweitwagen bei Verfügbarkeit eines solchen Systems mit Direktabholung vor der Haustür abzuschaffen [28]. Durch die Veränderung der Pkw-Besitzraten würde sich der Stellplatzbedarf verändern. Dies könnte so weit gehen, dass der ruhende Verkehr weitgehend zugunsten multifunktionaler Wegflächen entfällt. Diese Flächen könnten breiter als bisherige sein und unterteilt in einen befahrbaren Raum für Fahrräder und möglicherweise elektrisch unterstützte Mikrofahrzeuge mit Geschwindigkeiten bis etwa 30 km/h und in eine Fahrbahn für schwerere und schnellere Fahrzeuge.

Eine weitere Veränderung der Gestalt städtischen Raums ist die Einrichtung von Aus- und Zustiegsstationen, welche die Ausprägung von Mobilitätsknoten weiter fördert, insbesondere solche mit Umstiegsmöglichkeiten zum sonstigen ÖV. Über die Umgestaltung dieser Räume zum Halten, zur Aufnahme von Passagieren oder zum Kurzparken hinaus

sind Nutzungsänderungen zu erwarten, wie beispielsweise die Zunahme und Konzentration von Dienstleistungs- und Einkaufsgelegenheiten an den Knoten.

Durch die weitreichende Umgestaltung des öffentlichen Verkehrssystems sind auch Auswirkungen auf die komplementären ÖV-Infrastrukturen und -nutzungen denkbar. Ein Umstieg von Nutzern vom eigenen Pkw auf ein autonomes Taxiangebot, welches mit einem leistungsfähigen schienengebundenen Liniennetz verknüpft ist, würde das Passagieraufkommen auf diesen Strecken stärken und sehr wahrscheinlich Kapazitätsanpassungen nach sich ziehen müssen.

11.4 Wesentliche Treiber für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten

In den vorangegangenen Abschn. 11.2 und 11.3 wurden vorhandene Szenarien analysiert und anhand unterschiedlicher Ausprägungen die Wirkungen eines durch autonomes Fahren beeinflussten Verkehrssystems auf die Stadtstruktur diskutiert. Anknüpfend daran hinterfragt dieser Abschnitt, welche Einflussfaktoren besonders bedeutsam für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten sein könnten.

Die Diskussion der Szenarien zeigt zunächst die herausragende Bedeutung technologischer Innovationen, in deren Zusammenhang autonomes Fahren eine zunehmende Rolle im Verkehrssystem erlangt. Fortschritte und neue Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie, der elektronischen und digitalen Infrastruktur, des Datenmanagements und der künstlichen Intelligenz sind wesentliche Treiber dieses Trends, wobei die Automatisierung der Verkehrsmittel als Teil einer „umfassenderen“ Automatisierung von Prozessen in Städten gedeutet werden kann. Beispiele hierfür sind die Automatisierung des Parkens oder des Energie- und Gebäudemanagements.

Damit einhergehend zeigt sich, welche hohen Erwartungen an die Steuerungskapazitäten des Staates mit der Entwicklung eines Verkehrssystems mit autonomen Fahrzeugen verbunden sind. Der Staat kooperiert mit dem Privatsektor, um die erforderlichen Technologien zu entwickeln. Er flankiert dies durch eine neue Gesetzgebung bezüglich Zulassung, Haftungsrecht und Versicherungswesen sowie durch ein Akzeptanz schaffendes Konzept zu den Themen Datenmanagement und Standardisierung von Daten.

Hinsichtlich der Akzeptanz autonomen Fahrens durch die Bevölkerung wird deutlich, dass eine Reihe denkbarer Faktoren positiven Einfluss nehmen könnten. Zum einen verbindet sich mit dem autonomen Fahren der gesellschaftliche Nutzen eines effizienteren und umweltschonenderen Verkehrssystems. Zum anderen ist es durchaus vorstellbar, dass die Akzeptanz von privaten Nutzern und wirtschaftlichen Akteuren aufgrund der individuellen Vorteile für Lebensstil oder Handel in den kommenden Jahrzehnten steigen wird, insbesondere unter Annahme einer sichtbaren Technologie- und Akzeptanzförderung durch den Staat.

Ein weiterer Faktor, der die Automatisierung positiv beeinflussen dürfte, ist die Perspektive einer kosteneffizienteren Nutzung und Aufwertung städtischen Raums. Ein Bei-

spiel ist das Parken, für das eine Automatisierung deutliche Kostenersparnisse für die Erstellung von Parkflächen und aufgrund von Reduzierung des Flächenbedarfs Potenziale für Umwandlung in andere Nutzungen verspricht. Aber auch Flächen am Stadtrand oder im Umland werden im Zuge einer denkbaren Neubewertung von Standortwahlkriterien und steigender Attraktivität als Wohnstandort möglicherweise an Wert gewinnen.

Allerdings darf nicht darüber hinweggesehen werden, dass den genannten Faktoren große Unsicherheiten gegenüberstehen. Zunächst ist, angesichts grundsätzlicher rechtlicher und ethischer Fragen (s. Kap. 25 und Kap. 4), überhaupt nicht absehbar, in welcher Geschwindigkeit und in welcher Ausprägung sich städtische Verkehrssysteme mit autonomen Fahrzeugen entwickeln werden.

Auch die Folgen für den Verkehr und damit die Stadtstruktur sind damit derzeit noch nicht verlässlich prognostizierbar. Mit der Integration autonomen Fahrens als Teil eines kollektiven, öffentlichen Verkehrssystems dürften sich Carsharing und der Rückgang des Pkw-Besitzes stärker entwickeln. Eine verstärkte Akzeptanz und Nutzung des „eigenen“ autonomen Pkw dürfte die Perspektiven für den motorisierten Individualverkehr stärken. Insbesondere in letzterem Fall stellt sich die Frage nach möglichen „Rebound-Effekten“. Durch Zeiteinsparungen und geringere Nutzungskosten kann es zu einem höheren Konsum von Mobilität und zur Zunahme der Fahrleistung kommen [22]. Mit einer Zunahme autonomer Fahrzeuge wäre unter diesen Umständen eine Kompensation von Kapazitätsgewinnen die Folge.

Allerdings ist auch die Frage danach, wie sich die Höhe der zusätzlichen Kosten für die Nutzung autonomer Fahrzeuge entwickeln dürfte, derzeit noch nicht beantwortet. Die in diesem Kapitel analysierten Szenarien gehen auf diesen Punkt nicht plausibel ein, sondern argumentieren lediglich mit der Annahme, dass die Mobilität auch in der Zukunft bezahlbar sein wird. Kalkulationen zusätzlicher Kosten für die Ausrüstung von Pkw gehen jedoch davon aus, dass sich sowohl die Anschaffungs- als auch die Unterhaltungskosten zunächst deutlich erhöhen dürften [22, 28]). Hinzu kämen Folgekosten für Kommunen für die Anpassung von Verkehrsinfrastrukturen sowie für die Erschließung neuer Siedlungsgebiete in dem Fall, dass die Attraktivität von suburbanen Standorten in der Tat zunehmen würde.

Aus all diesen Aspekten folgt eine hohe Planungsunsicherheit für kommunale und regionale Akteure der Politik, der Verwaltungen, Verkehrsbetreiber sowie der Immobilienwirtschaft. Insbesondere die Anpassung von Infrastrukturen des Verkehrs und der Siedlungsentwicklung erfordert eine langfristige Herangehensweise einschließlich der entsprechenden Regulation und Finanzierung. Veränderungen der Raumstrukturen im Zuge autonomen Fahrens sind erst dann zu erwarten, wenn die meisten Fahrzeuge auf der Straße automatisiert sind. Solange dies nicht der Fall ist, dürften Verkehrsdichten nicht signifikant steigen, die Planbarkeit von Trips sich nicht verbessern, der Parkbedarf sich nicht wesentlich reduzieren und können Straßenquerschnitte nicht verringert werden. Damit fehlen zumindest den Akteuren kommunaler Verkehrs- und Stadtplanung derzeit noch wichtige Entscheidungs- und Handlungsgrundlagen nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund fehlender Klarheit, in welcher Form sich autonomes Fahren mittel- bis langfristig durchsetzen wird.

11.5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Kernanliegen dieses Beitrags ist es, mögliche stadtstrukturelle Entwicklungen unter dem Einfluss eines Verkehrssystems mit autonomen Fahrzeugen auszuloten und abzuschätzen, in welcher Weise politische und ökonomische Rahmenbedingungen diese Entwicklungen beeinflussen können. Auf Basis verfügbarer Szenarien bzw. Visionen zur „Stadt von morgen“ und deren Vorstellungen bezüglich einer Integration von Verkehrssystemen mit autonomen Fahrzeugen zeigt er auf, dass unterschiedliche Entwicklungen denkbar sind: zum einen das autonome Privatfahrzeug, welches je nach Szenario „bordautonom“ durch einen Autopiloten gesteuert wird oder durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation in den Verkehrsfluss eingebunden ist, oder zum anderen das autonome Fahren als integrierter Teil des öffentlichen Verkehrsangebots.

Abhängig von diesen unterschiedlichen Ausprägungen haben autonome Verkehrsmittel das Potenzial, das Verkehrssystem in ganz unterschiedlicher Weise zu verändern. Ihre Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten werden auch Auswirkungen auf Entscheidungen zur Entwicklung von Flächennutzungen und Raumstrukturen haben. Einflussbereiche umfassen beispielsweise den Bedarf und die Organisation des Parkens sowie die Attraktivität von Räumen als Wohnstandort, Einkaufs- oder Arbeitsziel. Darüber hinaus haben autonome Fahrzeuge das Potenzial, derzeit für Verkehrs- und Parkflächen genutzte Flächen in andere Nutzungen (sei es für andere verkehrliche Nutzungen wie Rad- oder Fußverkehr oder aber bauliche Nutzungen) zu überführen. Welche Veränderungen sich konkret vollziehen könnten, hängt dabei stark davon ab, in welche Richtung sich autonomes Fahren entwickeln wird.

11.5.1 Aspekte in der Diskussion um automatisiertes Fahren aus Sicht der Stadtentwicklung und Stadtplanung

Die Diskussion macht deutlich, dass eine Reihe möglicher Wirkungen autonomer Fahrzeuge auf Raumstrukturen existieren, die als Kriterien für die Entscheidung des Besitzes und der Nutzung autonomer Fahrzeuge relevant sind. Die Möglichkeit von Haushalten, ihre „suburbanen“ Präferenzen leichter zu realisieren, ist ein Beispiel hierfür. Entscheidungszusammenhänge zwischen längerfristigen (Standortwahl) und alltäglichen Mobilitätsentscheidungen (Wahl von Zielen und Verkehrsmitteln) sollten in die Diskussion um das autonome Fahren eingehen. Hinzu kommt, dass diesen individuellen Kriterien relevante Aspekte gegenüberstehen, die sich auf den gesellschaftlichen Nutzen einer Automatisierung des Verkehrssystems beziehen. Dies betrifft beispielsweise die Folgekosten für die Erschließung neuer Siedlungsgebiete am Stadtrand als Folge geänderter Attraktivität solcher Gebiete. Inwieweit sich diese Zusammenhänge mit der Einführung autonomen Fahrens tatsächlich realisieren und wie die Folgen zu bewerten sind, sollte verstanden und in der Diskussion um das automatisierte Fahren zwingend werden.

Ein zweiter Aspekt betrifft die Erkenntnis, dass im Zuge der Veränderung des Verkehrssystems neben möglichen Änderungen von Flächennutzungen eine weitreichende Transformation hin zu neuen Infrastrukturen und umgestalteten Verkehrsflächen denkbar ist. Diese müssen die Entwicklungen der Fahrmuster und Verhalten von automatisierten Fahrzeugen und nicht automatisierten Fahrzeugen, aber auch andere Modi berücksichtigen. All das ist eine langfristige Aufgabe. Denn Veränderungen der Raumstrukturen im Zuge autonomen Fahrens sind erst dann zu erwarten, wenn die meisten Fahrzeuge auf der Straße automatisiert sind. Hier sind viele Fragen noch offen. So besteht ein Bedarf zur Analyse, wie autonomes Fahren die langfristigen Pläne zur Gestaltung von Parkflächen, Fahrradspuren, Kreuzungen, Bürgersteigen, Querschnittsgestaltungen von Straßen etc. beeinflussen könnte. Wesentlich für die Diskussion ist die Frage: Wie kann eine sukzessive Transformation hin zu einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen gestaltet werden, und was sind überhaupt plausible Einführungszenarien? Dabei wird nicht nur zu klären sein, wie vorhandene Infrastrukturen graduell „umgebaut“ werden können, sondern wie sich in diesem Zuge die derzeitige Bevorrechtigung und Rollen unterschiedlicher Modi und Verkehrsmittel verändern. Wie beschrieben, ist es vorstellbar, dass mit der Zunahme autonomer Fahrzeuge und der Einrichtung von speziellen Fahrspuren eine Entwicklung hin zu einer stärkeren Funktionstrennung zwischen den verschiedenen Modi einhergeht. Auch die Durchlässigkeit des Straßenraums für andere Verkehrsteilnehmer im Zuge eines dicht fließenden Verkehrs mit autonomen Fahrzeugen dürfte bei dieser Entwicklung verändert werden. Dies wirft die Frage auf, in welcher Form und wie gleichberechtigt die Nutzungsmischung unterschiedlicher Verkehrsmodi unter dem Einfluss autonomen Fahrens zukünftig organisiert werden sollte.

Spätestens hier wird deutlich: Nicht nur Aspekte der Stadtentwicklung sind relevant für die Diskussion um das autonome Fahren. Die Automatisierung des Verkehrssystems ist von großer Relevanz für Stadtplanung und -entwicklung und die hierfür entwickelten Leitbilder und Ziele. Inwieweit und unter welchen Voraussetzungen kann ein Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen zur Realisierung derzeit gültiger Modelle wie die dichte und kompakte Stadt beitragen? Oder verknüpft sich damit die Aussicht auf die Rückkehr zur autogerechten Stadt? In welcher Beziehung stehen städtebauliche Elemente zur Strukturierung des autonomen Verkehrs zu den Anforderungen einer allenthalben propagierten Fußgänger-, Rad-, und Bahnstadt? Bedarf es unter dem Einfluss des automatisierten Fahrens der Formulierung grundlegend anderer bzw. neuer Leitbilder zur Entwicklung von Städten? Die Diskussion um Antworten auf diese Fragen kann beginnen.

Literatur

1. Cervero, R., Kockelman, K. (1997): Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 2, Issue 3, September 1997, Pages 199–219. DOI: 10.1016/S1361-9209(97)00009-6
2. Apel, D. (2003): Der Einfluss der Verkehrsmittel auf Städtebau und Stadtstruktur. In: Bracher, T.; Haag, M.; Holzapfel, H.; Kiepe, F.; Lehmbrock, M.; Reutter, U. (Hrsg.): HKV – Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung
3. RAND Corporation (2014): Autonomous Vehicle Technology. A Guide for Policymakers. URL: http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-1.html; Zugriff am 2. Juli 2014
4. Wilson, I. H. (1978): Scenarios. In: Fowles J. und Fowles, R. B. (Hrsg.): Handbook of Futures Research. Greenwood Pub Group Inc, Westport und London, S. 225–247
5. von Reibnitz, U. (1992): Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung. Gabler Verlag, Wiesbaden
6. Steinmüller, K. H. (1997): Grundlagen und Methoden der Zukunftsforschung – Szenarien, Delphi, Technikvorausschau. Werkstattbericht 21. Sekretariat für Zukunftsforschung. Gelsenkirchen. URL: <http://steinmuller.de/media/pdf/WB%2021%20Grundlagen.pdf>; Zugriff am 14. April 2014
7. Foresight Directorate (2006): Intelligent infrastructure futures. The Scenarios – Towards 2055 URL: <http://www.bis.gov.uk/assets/foresight/docs/intelligent-infrastructure-systems/the-scenarios-2055.pdf>; Zugriff am 12. April 2014
8. Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V. (2012): Visionen zur Morgenstadt. Leitgedanken für Forschung und Entwicklung von Systeminnovationen für nachhaltige und lebenswerte Städte der Zukunft. URL: http://www.morgenstadt.de/de/_jcr_content/stage/linklistPar/download/file.res/Fraunhofer_Visionen%20zur%20Morgenstadt_050212.pdf; Zugriff am 14. April 2014
9. Stadt Wien (Magistrat 18 der Stadtentwicklung und Stadtplanung) (2012): smart city Wien – towards a sustainable development of the city (= Blue Globe ReportSmartCities #1/2012) URL: <http://www.smartcities.at/assets/Projektberichte/Endbericht-Langfassung/BGR01-2012-K11NE2F00030-Wien-v1.0.pdf>; Zugriff am 12. April 2014
10. Bundesministerium für Bildung und Forschung (n.D.): Morgenstadt – eine Antwort auf den Klimawandel. URL: [http://www.bmbf.de/pubRD/morgenstadt\(1\).pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/morgenstadt(1).pdf); Zugriff am 2. Mai 2014
11. Promotorengruppe Mobilität der Promotorengruppe Mobilität Wirtschaft – Wissenschaft (2013): Abschlussbericht der Promotorengruppe Mobilität. URL: http://www.forschungsunion.de/pdf/mobilitaet_bericht_2013.pdf; Zugriff am 4. April 2014
12. Forum for the Future (2010): Megacities on the move. Your guide to the future of sustainable urban mobility in 2040. URL: http://www.forumforthefuture.org/sites/default/files/images/Forum/Projects/Megacities/megacities_full_report.pdf; Zugriff am 12. April 2014
13. Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A. M. (2011): Making Room for a Planet of Cities. Lincoln Institute of Land Policy. Cambridge, MA
14. Fagnant, D. J., Kockelman, K. M. (2013): Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, barriers and Policy Recommendations. Eno Foundation. URL: [http://www.eno-trans.org/wp-content/uploads/wp-content/uploads/AV-paper.pdf](http://www.eno-trans.org/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/AV-paper.pdf); Zugriff am 12. April 2014
15. Irmscher, I. (n.D.): Benutzerfreundliche automatische Parksysteime – Besondere Anforderungen – Planung – Einsatz. URL: www.givt.de/index.php/de/component/jdownloads/finish/4/22; Zugriff am 14. April 2014
16. Kowalewski, S. (2014): Überlassen Sie das Parken Ray. Deutschlandradio Kultur. URL: http://www.deutschlandradiokultur.de/technologie-ueberlassen-sie-das-parken-ray.2165.de.html?dram:article_id=290092; Zugriff am 2. Mai 2014

17. Mitchell, W.J., Boronni-Bird, E., Burns, L.D. (2010): Reinventing the Automobile. Personal Urban Mobility for the 21st Century. The MIT Press. Cambridge, MA
18. LEG Stadtentwicklung GMBH (2008): Mobilitätshandbuch Zukunftsstandort Phoenix West. Dortmund. URL: http://www.mobilitaetsmanagement.nrw.de/cms1/download/mobilitaetshandbuch_phoenix.pdf; Zugriff am 5. Mai 2014
19. Continental AG (2014): Der Fahrer entscheidet, das Auto übernimmt. URL: http://www.conti-online.com/www/automotive_de_de/themes/passenger_cars/automated_driving
20. Audi (2012): Automatisch ins Parkhaus. URL: <http://blog.audi.de/2012/09/21/automatisch-ins-parkhaus/>; Zugriff am 2. Mai 2014
21. Litman, T. (2014): Ready or waiting. Traffic Technology International. January. 37–42. URL: <http://www.trafficechnologytoday.com>; Zugriff am 2. Mai 2014
22. Litman, T. (2014): Autonomous Vehicle Implementation Prediction. Implications for Transport Planning. URL: <http://www.vtpi.org/avip.pdf>; Zugriff am 14. Juni 2014
23. Le Vine, S., Polack, J. (2014): Automated Cars: A smooth ride ahead? ITC Occasional Paper-Number Five, February 2014. URL: <http://www.theitc.org.uk/docs/114.pdf>; Zugriff am 14. April 2014
24. Angerer, F., Habdler, G. (2008): Integration der Verkehrs- in die Stadtplanung. In: : Steierwald, G.; Künne, H. D. & Vogt, W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. 2. Auflage, Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. S. 18–28
25. Guth, D., Siedentop, S., Holz-Rau, C. (2012): Erzwungenes oder exzessives Pendeln? Zum Einfluss der Siedlungsstruktur auf den Berufspendelverkehr. In: Raumordnung und Raumforschung (2012) 70, S. 485–499
26. Destatis (Statistisches Bundesamt) (2014): Berufspendler: Infrastruktur wichtiger als Benzinpreis. URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/Arbeitsmarkt/2014_05/2014_05Pendler.html#Link3; Zugriff am 12. April 2014
27. McKenzie, B. (2014): Modes Less Traveled – Bicycling and Walking to Work in the United States: 2008–2012. American Community Survey Reports. URL: <http://www.census.gov/hhes/commuting/>; Zugriff am 5. April 2014
28. Silberg, G., Wallace, R., Matuszak, G. (2012): Self-Driving Cars: The Next Revolution, KPMG and the Centre for Automotive Research; URL: www.kpmg.com/Ca/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-next-revolution.pdf; Zugriff am 28. April 2014
29. Häfner, S., Rapp, H., Kächele, H. (2012): Psychosoziale Belastungen von Bahnpendlern und was soll man tun? In: Psychotherapeut 2012 (57): S. 343–351
30. Lewis, D. (2004): Commuters suffer extreme stress, in BBC, URL: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/4052861.stm; Zugriff am 4. Mai 2014
31. Fernandes, P. (2012): Platooning With IVC-Enabled Autonomous Vehicles: Strategies to Mitigate Communication Delays, Improve Safety and Traffic Flow. URL: <http://home.isr.uc.pt/~pedro/T-ITS-11-02-0065.pdf>; Zugriff am 2. Mai 2014
32. Brownell, C. K. (2013): Shared Autonomous Taxi Networks: An Analysis of Transportation Demand in NJ and a 21st Century Solution for Congestion. URL: <http://orfe.princeton.edu/~alaink/Theses/2013/Brownell,%20Chris%20Final%20Thesis.pdf>; Zugriff am 2. Mai 2014
33. Brownell, C. K., Kornhauser, A. (2013): Autonomous Taxi Networks: a fleet size and Cost Comparison between two emerging transportation models and the conventional automobile in the state of New Jersey. URL: http://orfe.princeton.edu/~alaink/TRB'14/TRB'14_BrownellPaper_0728v2.pdf; Zugriff am 14. April 2014
34. Gorton, M. (2008): Using Information Technology to Achieve a Breakthrough in Transportation in New York City. The Open Planning Project. August 2008. URL: <http://www.streetsblog.org/wp-content/pdf/SmartParaTransit.pdf>; Zugriff am 2. Mai 2014

Rita Cyganski

Inhaltsverzeichnis

12.1 Einleitung 242

12.2 Kriterien der Verkehrsmittelwahl 243

12.3 Die Verkehrsmittelwahl in angewandten Verkehrsmodellen 244

 12.3.1 Eine kurze Einführung in die generelle Funktionsweise
 von Verkehrsnachfragemodellen 244

 12.3.2 Entscheidungskriterien in angewandten Modellen der Verkehrsmittelwahl 246

12.4 Welche Wirkung könnte die Einführung autonomer Fahrzeuge
auf unser Verkehrsmittelwahlverhalten zeigen? 247

 12.4.1 Der Autobahnpilot: ein Pkw mit dem besonderen Etwas
 für Ausnahmesituationen? 248

 12.4.2 Valet-Parken – nie mehr einen Parkplatz suchen? 248

 12.4.3 Bequem und sicher ans Ziel mit einem vollautomatisierten Fahrzeug 249

 12.4.4 Das Vehicle-on-Demand – Zipcar on Steroids? 250

 12.4.5 Das Auto der Zukunft: Konkurrenz für das Auto, das Taxi oder die Bahn? 251

12.5 Welche Einsatzmöglichkeiten sehen Privatpersonen
für autonome Fahrzeuge? Erste Ergebnisse einer Befragung 251

 12.5.1 Wer kann sich vorstellen, sein bisher bevorzugtes Verkehrsmittel zu ersetzen? ... 252

 12.5.2 Worin sehen die Befragten den spezifischen Vorteil der autonomen Fahrzeuge? .. 255

 12.5.3 Was machen wir heute und zukünftig unterwegs? 256

R. Cyganski (✉)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung, Deutschland
Rita.Cyganski@dlr.de

12.6 Autonome Fahrzeuge in der Nachfragemodellierung: Möglichkeiten und Grenzen einer Integration	257
12.7 Zusammenfassung und Ausblick	260
Literatur	262

12.1 Einleitung

Luis G. Willumsen, einer der renommiertesten Wissenschaftler für die Verkehrsmodellierung, stellte 2013 auf einer Fachkonferenz fest: „We can no longer ignore them [autonome Fahrzeuge], if planning horizon is 10+ years“ [37]. Doch Arbeiten, die versuchen, die Auswirkungen der autonomen Fahrzeuge auf die Alltagsmobilität der potenziellen Nutzer und konkret deren Verkehrsmittelwahl zu antizipieren, finden sich erst selten [11], [19], [37]. Allerdings erlaubt ein Blick auf die individuellen Treiber unseres täglichen Mobilitätsverhaltens bereits jetzt vorsichtige Aussagen zu etwaigen Verhaltensänderungen durch die Einführung autonomer Fahrzeuge. Analogieschlüsse zur Nutzung bekannter Verkehrsmittel und ihre Übertragung in Verkehrsnachfragemodelle lassen erste quantitative Aussagen über Auswirkungen auf die Gesamtverkehrsnachfrage zu. Die Nachfragemodellierung ermöglicht es hierbei, zwischen unterschiedlichen räumlichen Kontexten und Nutzergruppen zu unterscheiden und verschiedene Szenarien zum Einsatz solcher Systeme zu evaluieren.

Ziel des Kapitels ist es, erste Ansätze zur Berücksichtigung autonomer Fahrzeuge bei der Verkehrsmittelwahl – auch „Modalwahl“ genannt – in Personenverkehrsnachfragemodellen zu skizzieren. Hierzu wird zunächst aufgezeigt, welchen Faktoren eine zentrale Rolle bei den individuellen Abwägungsprozessen zwischen unterschiedlichen Verkehrsmitteln zukommt. Der anschließende Abschnitt gibt eine kurze Einführung in die Funktionsweise von Verkehrsnachfragemodellen. Nachfolgend wird eruiert, welche Änderungen im Verkehrsmittelwahlverhalten durch die Einführung von autonomen Fahrzeugen möglich erscheinen. Differenziert nach unterschiedlichen Nutzungsszenarien wird erörtert, welche Eigenschaften der neuen Fahrzeuge, aber auch des räumlichen Kontextes und der etwaigen Nutzer selbst für die Wahrnehmung und Bewertung der Fahrzeuge von Bedeutung sein könnten und in welchem Konkurrenzverhältnis diese Fahrzeuge zu den bisherigen Verkehrsmitteln stehen. Zur Stützung der Ausführungen werden erste Ergebnisse einer Onlinebefragung zur Haltung gegenüber autonomen Fahrzeugen sowie ihres antizipierten Einsatzes vorgestellt. Abschließend wird aufgezeigt, welche Herausforderungen bei einer Integration autonomer Fahrzeuge in die modellgestützte Verkehrsnachfragebetrachtung bestehen und welche Erweiterungen der Modelle, aber auch der vorhandenen Datenbasis für eine adäquate Abbildung notwendig wären.

12.2 Kriterien der Verkehrsmittelwahl

Die Frage, warum wir uns für bestimmte Verkehrsmittel entscheiden, ist Gegenstand einer Vielzahl an Publikationen aus unterschiedlichsten Disziplinen. Einigkeit herrscht darüber, dass dem menschlichen Verkehrsverhalten und der Verkehrsmittelwahl eine Vielzahl an komplexen interdependenten Faktoren zugrunde liegt. Bühler (2011) folgend, lassen sich diese in vier Gruppen unterteilen: (1) sozioökonomische und demografische Faktoren, (2) kultureller Rahmen und individuelle Einstellungen, (3) Strukturen der Raumentwicklung und (4) politische Regelungen [6]. Ortúzar und Willumsen (2005) nennen neben personenbezogenen Kriterien vor allem Eigenschaften der beabsichtigten Fahrt und nicht zuletzt des Verkehrsangebotes bzw. der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel als ausschlaggebend [24].

Von besonderer Bedeutung bei der Wahl des Verkehrsmittels ist die Frage nach dem Zugang zu den Verkehrsmittelalternativen. Führerscheinbesitz, die individuelle Einkommenssituation und damit eng verbunden der Pkw-Besitz gelten als wichtige Determinanten des Verhaltens. Substanzielle Investitionen wie die Anschaffung eines Pkw oder einer Zeitkarte für den öffentlichen Verkehr wirken langfristig auf die Verkehrsmittelwahl [31]. Deutliche Unterschiede im Modalwahlverhalten lassen sich nach Geschlecht, Erwerbsstatus, Haushaltsgröße und -struktur aufzeigen; einen besonderen Einfluss hat das Vorhandensein von Kindern im Haushalt [6], [24], [28]. Aber nicht nur objektiv messbare Kriterien spielen eine wichtige Rolle: Individuelle persönliche Lebensumstände, der eigene Lebensstil, Einstellungen zu den verschiedenen Verkehrsmitteln und zum Unterwegssein an sich, aber auch alltägliche Gewohnheiten und Routinen wirken auf die Entscheidung (vgl. [25], [27], [29], [33]). Die deutliche Wirkung der verkehrlichen Sozialisierung sowie sozialer und ökologischer Normen wird insbesondere bei lerntheoretischen, kognitiven und sozialpsychologischen Ansätzen betont (vgl. [2], [12], [27]). Sie zeigen deutlich, dass die individuellen Entscheidungen in der Praxis dem Idealbild eines unabhängig und rational entscheidenden Menschen oft nicht entsprechen.

Der Wohnstandort gilt als hauptsächlicher räumlicher Ankerpunkt der individuellen Verkehrsentscheidungen. Die dort bestehenden Raumstrukturen wirken direkt auf die Erreichbarkeit der angestrebten Ziele und die für Mobilität erbrachten Aufwände ([6], [9], [27], s. Kap. 11). So werden eine höhere Bevölkerungsdichte, eine starke Nutzungsmischung sowie die Nähe zum öffentlichen Verkehr mit geringerer Pkw-Orientierung und einer vermehrten Nutzung von Fuß und Rad in Verbindung gebracht; gleichzeitig treten Staus, Parkplatzknappheit sowie höhere Parkkosten verstärkt in dicht besiedelten Gebieten auf [6].

Die mit der Nutzung eines Verkehrsmittels einhergehenden finanziellen Kosten sind nicht zuletzt direkte oder indirekte Folgen politischer Regulierungen: Kraftstoff- und Haltungskosten, Maut- und Parkkosten beeinflussen die Bewertung des Pkw. Die zeitlichen Aufwendungen, insbesondere im Vergleich mit dem Zeitaufwand, der für die Alternativverkehrsmittel notwendig wäre, bilden ein weiteres wichtiges Wahlkriterium. Dabei gilt es, zwischen der Zeit, die im Vor- und Nachlauf einer Nutzung anfällt, also beispielsweise für

den Weg zur Bushaltestelle und den Weg von der Bushaltestelle zum eigentlichen Ziel, und den eigentlichen Reisezeiten zu unterscheiden. Im Falle des öffentlichen Verkehrs lässt sich darüber hinaus zeigen, dass Warte- und Umsteigezeiten sowie die Anzahl der Umstiege maßgeblich die Bewertung beeinflussen [36]. Aber nicht nur instrumentelle Faktoren eines Verkehrsmittels, sondern auch die damit verbundenen symbolischen und affektiven Aspekte spielen eine große Rolle [33]. So wirken die vermeintliche oder reale Verlässlichkeit und Pünktlichkeit eines Verkehrsmittels ebenso wie die damit assoziierte Sicherheit, der empfundene Komfort, Fahrspaß oder auch die Flexibilität auf die Entscheidung für oder gegen ein spezifisches Verkehrsmittel [4], [24], [33].

Die Wahl eines Verkehrsmittels ist darüber hinaus auch abhängig vom Zweck des Weges. Dabei gilt es, nicht nur den einzelnen Weg, sondern den Kontext der gesamten Wegekette zu berücksichtigen, also *alle* Fahrten, die zwischen dem Verlassen der Wohnung und der Rückkehr vorgenommen werden [4]. Anzahl und Art der Begleitpersonen können dabei ebenso den Ausschlag für die Wahl eines Verkehrsmittels geben wie Transportnotwendigkeiten oder die zurückzulegende Distanz [16], [25], [33].

12.3 Die Verkehrsmittelwahl in angewandten Verkehrsmodellen

12.3.1 Eine kurze Einführung in die generelle Funktionsweise von Verkehrsnachfragemodellen

Verkehrsnachfragemodelle sind wichtige, etablierte Werkzeuge in verkehrsbezogenen Planungs- und Entscheidungsprozessen. Sie ermöglichen die Analyse der momentanen Verkehrssituation, die Prognose der zukünftigen Entwicklung der Verkehrsnachfrage oder die Untersuchung verschiedener potenzieller Entwicklungspfade anhand von Szenarien. Grundlage eines Verkehrsnachfragemodells stellt die vereinfachte, zweckspezifische Abbildung der Wirkungszusammenhänge zwischen dem Mobilitätsbedarf und seiner räumlichen Konkretisierung dar. Verkehrsmodelle sind mathematische Modelle, die hohe Anforderungen an Umfang und Detailtiefe der Eingangsdaten stellen und insbesondere in Bezug auf das menschliche Entscheidungsverhalten und das vorhandene Verkehrsangebot auf eine profunde empirische Datenbasis angewiesen sind.

Ziel der Personenverkehrsmodellierung ist die Abbildung all jener Entscheidungen von Individuen, die im Zuge einer geplanten Ortsveränderung getroffen werden. In der ersten Modellstufe, der *Verkehrserzeugung*, wird zunächst die Frage adressiert, wie viele Ortsveränderungen im Untersuchungsgebiet vorgenommen werden. Dazu wird für die Bevölkerung ermittelt, wie viele Wege oder Aktivitäten pro Person gemäß der Statistik an einem Tag zu erwarten sind. Die erzeugten Wege oder Wegeketten werden dabei nach Wegezweck unterschieden. Je nach Zweck des Weges erfolgt im nächsten Modellschritt, der *Zielwahl* oder *Verkehrsverteilung*, die Zuweisung eines Zielpunkts des Weges. Für die Kombination aus Ausgangs- und Zielort wird in der dritten Modellstufe, der *Verkehrsmittelwahl* oder *Verkehrsaufteilung*, zwischen den verschiedenen zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln

abgewogen und eines ausgewählt. Im abschließenden Schritt, der *Verkehrsumlegung* oder *Verkehrswegewahl*, wird für die Fahrten gegebenenfalls der Startzeitpunkt bestimmt und festgelegt, welche Route genutzt wird, um vom Ausgangs- zum Zielort zu gelangen. Grundlage hierfür ist das sogenannte Angebotsmodell, in dem die zur Verfügung stehenden Verkehrssysteme detailliert abgebildet sind und so Attribute der verschiedenen Strecken – z. B. die Reisezeiten zwischen zwei Orten – ermittelt werden können. Als Ergebnis einer Verkehrsnachfragemodellierung liegen für den Untersuchungsraum die Ortsveränderungen der Bevölkerung sowie die resultierenden Verkehrsstärken für die einzelnen Verkehrsträger vor. Die einzelnen, hier vereinfacht sequenziell dargestellten Modellstufen finden in der Praxis oftmals simultan bzw. rekursiv Anwendung – insbesondere die Verkehrsmittel- und Zielwahl werden häufig kombiniert. Für eine vertiefende Darstellung der Verkehrsmodellierung sei auf [5] und [24] verwiesen.

Verkehrsnachfragemodelle werden in der Regel in mikroskopische und makroskopische Modellansätze unterschieden. Die Modellansätze unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der notwendigen Informationen und Eigenschaften als auch der Modelllogik bei der Abbildung von Entscheidungszusammenhängen. In *makroskopischen Nachfragemodellen*, oftmals auch als Vier-Stufen-Modelle (Four Steps Models, FSM) bezeichnet, spiegeln sich die genannten vier Stufen der Verkehrsmodellierung direkt wider. Die Bevölkerung im Untersuchungsgebiet wird anhand ihrer soziodemografischen, verkehrlich relevanten Eigenschaften derart in Gruppen unterteilt, dass das Verhalten innerhalb einer Gruppe möglichst ähnlich ist, im Vergleich zu anderen Gruppen jedoch signifikant abweicht. Typische Einteilungen erfolgen hierbei anhand des Geschlechts, des Alters, des Erwerbsstatus sowie des Pkw-Besitzes. Eine Berücksichtigung des Haushaltskontextes findet in der Regel nicht statt (s. zu Details u. a. [18]). Im Verlauf der Modellierung werden alle Wege, die von Individuen dieser Gruppen generiert werden, gemeinsam und unabhängig von den sonstigen Ortsveränderungen des Tages modelliert. Für weiterführende Darstellungen der Funktionsweise makroskopischer Modelle sei auf [5] sowie [22] verwiesen.

Insbesondere in der regionalen Modellierung in den USA haben sogenannte aktivitätenbasierte oder *mikroskopische Modellierungsansätze* der Verkehrsnachfrage in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Im Vergleich zu makroskopischen Modellen legen diese einen stärkeren Fokus auf die individuellen Mobilitätsentscheidungen, die von Personen getroffen werden, und berücksichtigen in stärkerem Maße detaillierte Eigenschaften einer Person sowie des Haushaltskontextes. Die einzelnen Wege des Tages werden zu Touren zusammengefasst modelliert, die jeweils zu Hause starten und enden. Diese Form der Darstellung erlaubt die Berücksichtigung von Verhaltensabhängigkeiten zwischen einzelnen Aktivitäten und Entscheidungen. Im Zuge einer Mikrosimulation werden die Wegeketten für alle Personen im Untersuchungsgebiet einzeln berechnet und ergeben so das Gesamtbild der Verkehrsnachfrage. Vertiefte Informationen zur Funktionsweise aktivitätenbasierter Modellierungsansätze finden sich in [7], [10] und [21].

12.3.2 Entscheidungskriterien in angewandten Modellen der Verkehrsmittelwahl

Der Verkehrsmittelwahl kommt eine herausragende Bedeutung bei der Nachfragemodellierung zu, sind ihre Resultate doch in hohem Maße planungs- und politikrelevant [24]. Zum Einsatz kommen in der Regel diskrete Wahlmodelle oder eng verwandte Methoden, die auf der Annahme eines streng rationalen Entscheidungsverhaltens basieren. Dabei handelt es sich um statistische Kausalmodelle, mit deren Hilfe Aussagen zu den jeweiligen Einflussfaktoren und ihre Einflussstärke auf die Entscheidung hergeleitet werden können. Geht man davon aus, dass sich der Gesamtnutzen einer Wahlalternative additiv aus den einzelnen Komponenten herleiten lässt, kann so der Nutzen einer Alternative berechnet und mit demjenigen der anderen zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel verglichen werden. Die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer Variante steigt mit ihrem relativen Vorteil gegenüber den sonstigen Optionen [20], [24]. Die spezifizierten Modelle können von unterschiedlicher Komplexität sein (vgl. beispielsweise [34]). Verkehrsmittelwahlmodelle, die in Nachfragemodelle integriert werden, berücksichtigen in der Regel jedoch nur wenige Variablen, welche die Eigenschaften der Verkehrsmittel, der Personen, der Wege sowie der Raumstruktur umfassen.

Bei der Beschreibung der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel nehmen die finanziellen und zeitlichen Kosten, die mit der Wahl einhergehen, die herausragenden Stellen ein. Im Falle des Pkw werden hier vorrangig Verbrauchskosten berücksichtigt, seltener Kosten der Anschaffung und Haltung. Bei den Zeitkosten handelt es sich vor allem um die durchschnittliche Fahrzeit, seltener und vor allem im öffentlichen Verkehr auch um die Zu- und Abgangszeiten. Bei letzterem werden oftmals zusätzlich die Anzahl der Umstiege, die Warte- und Umsteigezeiten oder auch Bedienungsintervalle berücksichtigt. Elemente wie die Zuverlässigkeit der Reisezeit finden sich bisher vorrangig in analytischen Modellen [4]. Mittels einer verkehrsmittelspezifischen Konstante können darüber hinaus nicht weiter spezifizierbare Nutzenkomponenten aggregiert Berücksichtigung finden. Alter, Geschlecht und Erwerbsstatus sowie Führerschein- und Pkw-Besitz zählen zu den üblichen soziodemografischen Attributen in den Modellen. Seltener finden sich Einkommensvariablen, das Bildungsniveau sowie die Haushaltsgröße oder die Anzahl der Kinder. Insbesondere bei den soziodemografischen Eigenschaften ist es üblich, diese bei der Ermittlung des Nutzens mit anderen Attributen zu interagieren und so personengruppenspezifische Stärken des Einflusses abzubilden. Die Beurteilung eines Verkehrsmittels kann auch von dem Zweck des Weges abhängen, und so sind ebenfalls wegezweckspezifische Interaktionsterme nicht unüblich. Eine besondere Bedeutung kommt hier der Unterscheidung der Arbeitswege zu. Aber auch die Transportnotwendigkeit oder die häufige Begleitung bei spezifischen Wegezwecken wie Einkauf oder Reisen können entsprechende Differenzierungen bedingen. Einen weiteren Bereich bilden die Raum- und Kontexteigenschaften. So können offizielle Raumtypisierungen oder auch die Bevölkerungsdichte am Wohnort eingesetzt werden, um eine Unterscheidung zwischen ländlicheren und dicht besiedelten Gebieten vorzunehmen. In manchen Modellen finden sich darüber hinaus Faktoren zur Beschreibung der Parksituation, der Parkkosten oder etwaigen Mautgebiete.

Verkehrsnachfragemodelle sind stark datengetrieben und setzen die Möglichkeit voraus, quantitative Aussagen zu Wirkungszusammenhängen treffen zu können. Mangels Daten können zahlreiche Faktoren, die als relevant für die Verkehrsmittelwahl bekannt sind, oft nur vereinfacht in den Modellen Berücksichtigung finden. Betroffen sind vor allem sogenannte „weiche Faktoren“ wie Routinen, die wahrgenommene Bequemlichkeit und Verlässlichkeit eines Verkehrsmittels, der assoziierte Fahrspaß, das damit verbundene soziale Ansehen oder auch das individuelle Sicherheits- und Rückzugsbedürfnis. Aber nicht nur Einstellungsfaktoren, auch das Wissen über die Alternativen, der eventuelle Planungsaufwand und das Abstimmungsverhalten im Haushalt sind Beispiele für Aspekte, die bei der Verkehrsnachfragemodellierung trotz ihrer bekannten Relevanz bisher kaum Berücksichtigung finden (vgl. u. a. [35]).

Eine spezielle Herausforderung besteht darüber hinaus in der Abbildung neuer Verkehrsmittel. Die Liberalisierung des Fernbusverkehrs in Deutschland, die Einführung stationsungebundener Carsharing-Angebote oder auch die Markteinführung elektrisch angetriebener Pkw sind Beispiele für Modifizierungen bestehender Verkehrsmittelangebote, bei denen sich eine Vorhersage der Nutzung schwierig gestaltet und belastbare Zahlen zu den Wirkungszusammenhängen fehlen. Doch auch eine Abgrenzung der verschiedenen bestehenden Verkehrsmittel anhand „harter“ Faktoren ist nicht immer einfach. Verkehrsmodelle wurden historisch vor allem zur Berechnung der Fahrleistung von Pkw eingesetzt. Noch 2012 konstatiert Bates, klassischerweise hätten Vier-Stufen-Modelle kaum mehr als eine Differenzierung zwischen „privaten Modi“, d. h. Pkw-Nutzung, und „öffentlichen“ Modi enthalten und wären erst in letzter Zeit um weitere Aspekte wie beispielsweise die Unterscheidung zwischen Fahrer und Mitfahrer erweitert worden [5]. Auch eine Differenzierung der Pkw, beispielsweise nach Größe oder Antriebsart, findet erst in neuerer Zeit Eingang in die Modelle. Insbesondere für die Integration autonomer Fahrzeuge in die Betrachtung offenbaren sich hier große Herausforderungen – denn schließlich gilt es, „das Auto“ näher zu betrachten und eine deutliche Unterscheidung zwischen Fahren und Gefahrenwerden, dem eigenen und einem geliehenen Pkw oder auch einem Taxi zu ermöglichen.

12.4 Welche Wirkung könnte die Einführung autonomer Fahrzeuge auf unser Verkehrsmittelwahlverhalten zeigen?

Bevor der Frage nachgegangen wird, wie autonome Fahrzeuge in der Verkehrsmodellierung Berücksichtigung finden können, muss geklärt werden, wie sich die Einführung dieser Systeme auf die individuelle tägliche Mobilität auswirken könnte. Die potenzielle Nutzung autonomer Fahrzeuge oder auch neuer Mobilitätsangebote ist i. A. stark abhängig von ihren konkreten Einsatzmöglichkeiten und den Vorteilen, die sich im Vergleich zu momentan bereits verfügbaren Verkehrsmitteln bieten würden – von Faktoren also, die für die Bewertung der autonomen Fahrzeuge im Vergleich mit anderen Modi bei der Verkehrsmittelwahl relevant sind und somit – sofern möglich – Eingang in die Modelle finden sollten. Für die in Kap. 2 vorrangig unter technischen oder rechtlichen Gesichtspunkten beschriebenen

Anwendungsfälle werden daher in diesem Abschnitt zunächst mögliche Nutzungsvarianten erörtert. Im Vordergrund stehen dabei Fragen nach einer Typisierung der voraussichtlichen Nutzer, der Wege- und Einsatzzwecke, für die sich entsprechende Systeme besonders eignen, der Raum- oder Kontexteigenschaften, die eine Nutzung fördern, den relevanten Verkehrsmitelegenschaften sowie der Verkehrsmittelsubstitution, die sich als Resultat ergeben könnte. Der Fokus der Ausführungen wird auf diejenigen Eigenschaften gelegt, die sich für eine Abbildung in den Verkehrsmodellen eignen.

12.4.1 Der Autobahnpilot: ein Pkw mit dem besonderen Etwas für Ausnahmesituationen?

Der Autobahnpilot stellt möglicherweise ein Einstiegsszenario in die Automatisierung dar, da die Fahraufgabe außer in „Ausnahmesituationen“ bestehen bleibt. Die zwei Hauptaspekte des Autobahnpiloten aus der Nutzerperspektive stellen die Entlastung des Fahrers sowie die Möglichkeit, die Zeit während des Fahrens anders verbringen zu können, dar.

Der Einsatz des Autobahnpiloten wird nur auf spezifischen Strecken möglich sein und damit vorrangig auf Überlandfahrten. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass er sich vor allem bei Fahrten mit längerer Dauer positiv auf die Wahrnehmung und Bewertung des Pkws auswirken würde. Die Nutzerbefragung von Continental zeigt des Weiteren deutlich, dass die Abgabe der Fahraufgabe insbesondere bei stressbelasteten oder als lästig empfundenen Situationen wie Staus oder Baustellen positiv konnotiert ist [8]. Nicht selten wird damit aber auch eine Einschränkung des Fahrvergnügens verbunden [1].

Die Möglichkeit einer veränderten, zumeist mit erhöhter Sinnhaftigkeit oder Produktivität assoziierten Zeitnutzung ist nach der verbesserten Verkehrssicherheit der wohl meistgenannte Vorteil autonomer Fahrzeuge (s. beispielsweise [23], [26], [30], [32]). Insbesondere bei beruflich oder privat stark eingebundenen Personen, bei Fahrten mit Kindern oder in Begleitung könnte dies zu einer positiveren Bewertung der Reisezeit führen – einem der wichtigsten Faktoren bei der Verkehrsmittelwahl in Modellen. Letztendlich könnte dies dazu führen, dass längere Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln, insbesondere für Personen, die diese Zeit aktiv nutzen, relativ betrachtet unattraktiver werden und der Pkw als bequemer wahrgenommene Alternative an Zuspruch gewinnt. Die Bedeutung der alternativen Zeitnutzung ist jedoch schwer zu bemessen: In der Continental-Studie gab z. B. nur rund ein Drittel der Befragten die Möglichkeit einer alternativen Zeitnutzung als attraktiv an [8].

12.4.2 Valet-Parken – nie mehr einen Parkplatz suchen?

Beim Valet-Parken handelt es sich quasi um einen nur geringfügig modifizierten „normalen“ Pkw, bei dem die Fahraufgabe unverändert bestehen bleibt. Nur das Abstellen und das Vorfahren bei Nutzungswunsch übernimmt das Fahrzeug selbstständig innerhalb eines

definierten Radius. Gemäß einer Erhebung von AutoScout24 würden knapp zwei Drittel der Umfrageteilnehmer diese Funktion gern nutzen und nie wieder selbst einen Parkplatz suchen. Bei Bewohnern urbaner Gebiete ist der Anteil erwartungsgemäß höher [1] – ist die Funktion doch vor allem in Gebieten mit einer geringen Anzahl privater Stellplätze, mit Parkdruck und weiten Zu- und Abgangswegen vorteilhaft (s. auch Kap. 11). Sie hilft damit Zeit- und gegebenenfalls auch Parkkosten [19] zu sparen und wirkt komfortsteigernd, vor allem bei Transportaufgaben, dem Beisein von Kindern oder bei eingeschränkter Mobilität. Wenngleich eine höhere Carsharing-Nutzung vor allem bei der Einführung von Vehicles-on-Demand diskutiert wird (s. z. B. [11]), könnte der sinkende Zugangsaufwand beim Valet-Parken eventuell das Carsharing erleichtern. Als sichere Konsequenzen können eine substantielle Verringerung der Parksuchverkehre und damit einhergehend eine Senkung der Reisezeiten in bisher betroffenen Gebieten angesehen werden.

12.4.3 Bequem und sicher ans Ziel mit einem vollautomatisierten Fahrzeug

Das vollautomatisierte Fahren gilt als „Königsklasse der Fahrerassistenzsysteme“ [3]. Zwar wird – zumindest vorläufig – der Fahrzeuglenkende wohl prinzipiell in der Lage sein müssen, die Fahraufgabe zu übernehmen, notwendig soll dies aber nur auf Wunsch sein. Verbunden ist dieses Fahrkonzept bei hinreichenden Durchdringungsraten mit der Vision einer sichereren, zuverlässigeren Individualmobilität, einer Verbesserung des Verkehrsflusses und damit letztlich geringeren Stau- und Reisezeiten sowie einer erhöhten Planbarkeit des Reiseaufwandes [3], [26], [30]. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass Besitz- und Nutzungshemmungen gegenüber dem Pkw sinken, insbesondere bei unerfahrenen, unsicheren oder auch älteren Fahrenden. Der Pkw wird so beispielsweise auch bei schlechteren Fahrkonditionen wie Dunkelheit, unbekannten oder langen Strecken sowie schlechten Wetterbedingungen eine attraktivere Option (s. auch [11]). Als Folge davon ist mit einem Rückgang der Bringwege, der Nutzung des Taxis und des öffentlichen Verkehrs einerseits sowie einem Anstieg des Pkw-Besitzes andererseits zu rechnen.

Der aus Nutzersicht meistgenannte Vorteil entsprechender Fahrzeuge ist jedoch – analog zum Autobahnpiloten – die damit verbundene Hoffnung, „Zeit geschenkt [zu bekommen], die ich ganz für mich nutzen kann“ [26]. Es wundert daher wenig, dass zumeist Berufspendler als Zielgruppe dieser Technologie hervorgehoben werden (s. beispielsweise [17]) – bietet das vollautomatisierte Fahren doch auch und gerade in urbanen, dicht befahrenen Gebieten eine sinnvolle Nutzung der *Onboard*-Zeit. Auch hier gilt, dass dieser Vorzug vor allem dann zu einer positiveren Bewertung des Pkw führen dürfte, wenn die im Auto verbrachte Zeit vorher als nicht produktiv wahrgenommen wurde und der Fahrspaß nicht im Vordergrund der Nutzung steht. So lässt sich zeigen, dass der Nutzungswunsch besonders hoch bei Personen ausfällt, die sich nicht als passionierte Fahrer bezeichnen [17].

12.4.4 Das Vehicle-on-Demand – Zipcar on Steroids?

Ein Szenario, das von einer insbesondere in urbanen Räumen in weiten Teilen für jedermann verfügbaren und nutzbaren Flotte an Fahrzeugen ausgeht, würde sicherlich die weitreichendsten Auswirkungen auf das tägliche Verkehrsverhalten implizieren. Als konsequente Weiterführung des vollautomatisierten Fahrzeuges, jedoch ohne Übernahme einer Fahrfunktion, ermöglicht es die individuelle, unabhängige Mobilität auch für Personen ohne Führerschein und eigenen Pkw: Kinder, Alte, Mobilitätseingeschränkte, sensorisch Beeinträchtigte etc. (vgl. u. a. [19]).

Generell ist davon auszugehen, dass das Individualfahrzeug durch die damit gleichzeitig einhergehende Senkung der Zu- und Abgangszeiten insbesondere in Gebieten mit Stellplatzproblematik an Attraktivität gewinnen wird. Neben einer denkbaren Senkung der Parkkosten durch die Möglichkeit, das Fahrzeug auch in weiterer Entfernung zum eigentlichen Zielort abzustellen, ist mit einer deutlichen Verringerung sogenannter Bring- und Holwege sowie der Nutzung von Fahrdiensten und Taxis zu rechnen – eventuell bei gleichzeitiger Zunahme der Leerfahrten.

Als Folge der Einführung von Vehicle-on-Demand-Flotten wird gleichzeitig unisono eine substantiell niedrige Autobesitzquote erwartet [19], [37], die mit einem Boom des Carsharing einhergehen könnte: Silberg et al. (2012) sprechen mit Verweis auf das aus den USA stammende Carsharing-Unternehmen gar von „Zipcar on Steroids“ [30]. Insbesondere bei Zweitwagen erscheint es plausibel, dass diese durch entsprechende Angebote abgelöst würden, die gleichzeitig eine Anpassung des gewählten Fahrzeuges an die situative Beförderung- und Parksituation oder auch an Wetterbedingungen ermöglichen (vgl. [17], [37]).

Dass von einer substantiellen Wirkung auf den individuellen Pkw-Besitz ausgegangen werden kann, erwarten Fagnant und Kockelman (2013): Gemäß ihrer Simulationsrechnungen für die USA könnte ein einzelnes Vehicle-on-Demand bis zu 13 private Pkw substituieren [11]. Arbeiten zum stationsgebundenen Carsharing beziffern die Substitutionsraten auf bis zu acht durch ein einzelnes Carsharing-Auto ersetzte private Pkw in Deutschland [15]. Da ein Vehicle-on-Demand durch den Wegfall des Zugangsweges einen größeren Einzugsbereich abdecken könnte, erscheinen diese Abschätzungen durchaus nicht unrealistisch. Ein Blick auf die Nutzerstruktur bestehender Carsharing-Angebote gibt erste Hinweise auf die potenziellen Nutzer von Vehicle-on-Demand-Angeboten: Insbesondere jüngere Personen mit überdurchschnittlicher Bildung und Einkommenssituation sowie einem ausgeprägten Interesse an ökologischen Themen nutzen in Deutschland stationsgebundene Carsharing-Angebote; die noch recht neuen stationsungebundenen Angebote werden vor allem von urbanen, männlichen Nutzern als flexible Verkehrsmitteloption bei kürzeren Wegen eingesetzt (vgl. [13], [14]). Die Nutzung von Vehicle-on-Demand-Angeboten als Alternative zum eigenen Pkw könnten so direkt zur Förderung eines multimodalen Verkehrsmittelwahlverhaltens oder zu einem Anstieg von Fahrgemeinschaften beitragen (vgl. [26]). Insbesondere vor dem Hintergrund einer positiver beurteilten Zeit im Fahrzeug ist jedoch auch ein Anstieg der Pkw-Nutzung und -Fahrleistung im Zuge der omnipräsenten

Verfügbarkeit ([11], [37], s. Kap. 11) denkbar. Das Thema „Neue Mobilitätskonzepte“ wird in Kap. 9 umfassend betrachtet.

Doch nicht nur der individuelle Pkw-Besitz könnte in einem solchen Szenario weitreichenden Änderungen unterworfen sein. Fahrdienste, Taxen und der öffentliche Verkehr könnten sich in einer verschärften Wettbewerbssituation zum Individualtransportmittel wiederfinden. Insbesondere im ländlichen Raum könnten Vehicle-on-Demand-Flotten einerseits als flexible, individuelle Zubringerdienste zum öffentlichen Nahverkehr dienen oder die bequeme Überwindung der „letzten Meile“ im öffentlichen Fernverkehr gewährleisten. Kritische Betrachtungen erlauben aber auch die These, dass sie die Versorgung mit öffentlichen Massenverkehrsmitteln nicht ergänzen, sondern langfristig sogar ganz ersetzen könnten: „... eventually, mobility on demand may prove a better investment than new mass transit systems.“ [17]: eine Einschätzung, die auch von Willumsen (2013) geteilt wird [37]. In diesem Fall lassen sich Annahmen, dass die individuell zurückgelegten Personenkilometer deutlich ansteigen könnten, sicherlich nicht von der Hand weisen.

12.4.5 Das Auto der Zukunft: Konkurrenz für das Auto, das Taxi oder die Bahn?

Die Analyse der bisher zur Verfügung stehenden Literatur zeigt, dass die Einführung autonomer Fahrzeuge sehr unterschiedliche Auswirkungen auf unsere tägliche Mobilität und unsere gewählten Verkehrsmittel haben könnte. Das autonome Fahren stellt somit nicht immer nur eine leichte Modifikation unseres altbekannten Pkw dar, durch die sich der Verkehrsfluss und die Reisezeiten verbessern und wahlweise Unterstützungsoptionen genutzt werden können, wie eine Grafik in der KPMG-Studie [17] suggeriert. Vielmehr unterscheiden sich die potenziellen Auswirkungen auf die individuell oder auch öffentlich zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel enorm. Die weitreichenden Implikationen, die sich aus den unterschiedlichen Szenarien für das Gesamtverkehrssystem und die Nutzung des öffentlichen Raumes generell ergeben könnten, werden in Kap. 11 vertieft aufgegriffen. Deutlich zeigt sich in der vorangegangenen Literaturanalyse zu möglichen Auswirkungen auf die Verkehrsmittelwahl, dass die wahrnehmungs- und bewertungsrelevanten Eigenschaften in den verschiedenen Nutzungsszenarien sehr unterschiedlich sein können und somit eine differenzierte Betrachtung bei der Analyse einer möglichen Abbildung autonomer Fahrzeuge in der Verkehrsnachfragemodellierung erfordern.

12.5 Welche Einsatzmöglichkeiten sehen Privatpersonen für autonome Fahrzeuge? Erste Ergebnisse einer Befragung

Seit 2012 wurden vereinzelt quantitative Studien zum Thema des autonomen Fahrens durchgeführt [1], [8], [17]. Der Fokus der Erhebungen liegt in der Regel auf Einstellungs- und Akzeptanzfragen oder gewünschten Unterstützungsfunktionen. Mit einigen Fragen zur an-

tizipierten Nutzung und alternativen Zeitverwendung ist die Mobilitätsstudie 2013 von Continental [8] hervorzuheben. Allen Studien ist jedoch gemein, dass sie keine Differenzierung der möglichen Ausprägungen des autonomen Fahrens berücksichtigen und nicht auf die Art der möglichen Verhaltensänderungen oder der potenziellen Einsatzzwecke abzielen.

Aus diesem Grund wurde im Juni 2014 eine Erhebung durchgeführt, die empirische Aussagen sowohl zu Fragestellungen dieses Beitrags als auch zur Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (s. Kap. 6) sowie zur Akzeptanz autonomer Fahrzeuge (s. Kap. 29) ermöglicht. Dabei handelt es sich um eine quasi-repräsentative Onlineerhebung, die sich auf die Einstellungen der Befragten bezieht und auf ihre Einschätzung zur Nutzung eines autonomen Fahrzeugs entsprechend der verschiedenen Nutzungsszenarien des Projektes. Die nach Geschlecht, Alter, Einkommen und Bildung geschichtete Stichprobe umfasst jeweils 250 vollständige Fragebögen pro Nutzungsszenario, insgesamt also 1000 Befragte. Der Datensatz erlaubt es, mittels quantitativer Methoden eine erste Einschätzung zur Haltung verschiedener Nutzergruppen zu autonomen Fahrzeugen und Mobilitätsangeboten zu erlangen und so die Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes zu ergänzen. Ziel der Befragung aus Sicht der Nachfragemodellierung ist es vor allem zu ergründen, welche Unterscheidungen bei den Nutzern, den Wege- und Einsatzzwecken, aber auch den Verkehrsmiteigenschaften für eine Abbildung autonomer Fahrzeuge in Verkehrsmodellen wichtig sind. Auch sollen mithilfe der Datenanalysen erste Hinweise darauf erlangt werden, mit welchen Verkehrsmitteln die autonomen Fahrzeuge aus heutiger Sicht in Nutzungskonkurrenz stehen könnten und wie sich die Reisezeitverwendung und -bewertung ändern könnte.

Der Fragebogen enthält zunächst Fragen zur Soziodemografie der Probanden, zu ihrem Kenntnisstand und ihrem Interesse am autonomen Fahren sowie zur bisherigen Nutzung von Assistenzsystemen. Anschließend wird die momentane Nutzung von und Einstellung gegenüber den zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln und die übliche Zeitverwendung bei ihrer Nutzung erhoben. Die Probanden beantworten darüber hinaus für jeweils eines der im Projektkontext verwendeten Nutzungsszenarien Autobahnpilot, autonomes Valet-Parken, vollautomatisiertes Fahrzeug sowie Vehicle-on-Demand (s. Kap. 2) vertiefende Fragen zur antizipierten Nutzung, zum ersetzten Verkehrsmittel, zur Einstellung gegenüber dem beschriebenen Fahrzeug, zum Bedürfnis nach Interventionsmöglichkeiten, zu verschiedenen Erlebnisaspekten und zu konkreten Gestaltungswünschen. Die Beschreibungen der Szenarien sind dabei kurz gehalten, um den Befragungsteilnehmern Platz für eigene Interpretationen zu gewähren. Ein tabellarischer Überblick der soziodemografischen Eigenschaften der Befragten sowie der Stichprobenstruktur findet sich in Kap. 6.

12.5.1 Wer kann sich vorstellen, sein bisher bevorzugtes Verkehrsmittel zu ersetzen?

Um die Wirkung autonomer Fahrzeuge auf die Verkehrsmittelwahl abbilden zu können, ist es besonders wichtig zu wissen, welche Verkehrsmittel von diesen autonomen Fahr-

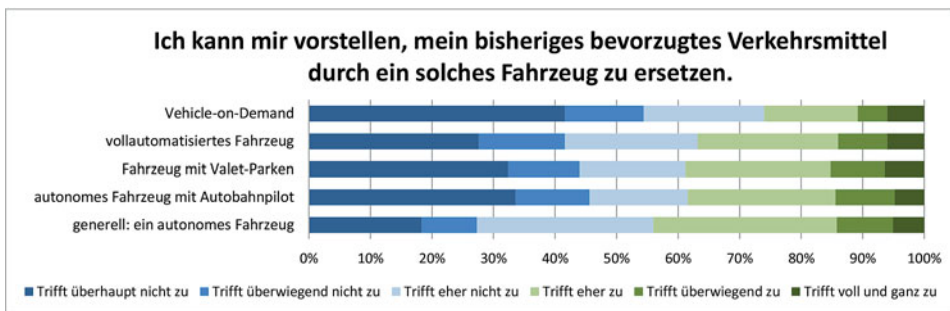


Abb. 12.1 Konstatierte Ersetzungsbereitschaft des bevorzugten Verkehrsmittels durch ein autonomes Fahrzeug generell sowie in den verschiedenen Nutzungsszenarien

zeugen substituiert werden könnten. Daher thematisiert die Erhebung in einer der ersten Fragen die grundsätzliche Bereitschaft, das bevorzugte Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen – zunächst ohne eine Differenzierung. Im weiteren Verlauf wird zusätzlich für die jeweiligen Nutzungsszenarien erhoben, ob die Befragten sich vorstellen könnten, ein entsprechendes Fahrzeug generell zu nutzen bzw. ihr bevorzugtes Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen. Die Ergebnisse wurden auch daraufhin untersucht, ob sich signifikante Unterschiede im Antwortverhalten der Befragten in Abhängigkeit von ihren soziodemografischen Eigenschaften und Einstellungen nachweisen lassen.¹ Entsprechende statistische Kennwerte zeigen auf, dass bei einer Integration in die Modelle eine Unterscheidung des Verhaltens anhand dieser Kriterien vorgenommen werden sollte – die konkrete Stärke oder Richtung der Wirkung ist zunächst zweitrangig.

Die jeweiligen Antworten für den Ersetzungswunsch sind in Abb. 12.1 dargestellt und entsprechen in der Tendenz dem generellen Einsatzwillen (s. Kap. 31). Auffällig ist, dass die Mehrheit der Befragten sich eher nicht bis gar nicht vorstellen kann, einem autonomen Fahrzeug den Vorrang vor ihrem bisherigen Standardverkehrsmittel zu geben. Weniger als 15 Prozent der Befragten stimmen der Aussage zu, ein – wie auch immer geartetes – autonomes Fahrzeug überwiegend oder ganz als Ersatz nutzen zu wollen. Während bei der generellen Aussage der Anteil der unentschiedenen Befragungsteilnehmer sehr hoch ausfällt, sinkt der Zustimmungswert in den Szenarien deutlich und unterscheidet sich statistisch signifikant zwischen den einzelnen Szenarien. Mit nur rund einem Viertel positiver Antworten sticht das Vehicle-on-Demand dabei als besonders skeptisch betrachteter Anwendungsfall heraus. Dem Vollautomaten hingegen stehen die Befragten im Durchschnitt am positivsten gegenüber.

¹ Als statistisch signifikant werden nachfolgend Unterschiede aufgeführt, die bei einem Chi-Quadrat-Test nach Pearson Werte von 0,05 oder niedriger aufweisen. Bei einigen Variablen, insbesondere den Einstellungs- und Raumvariablen war ein Test aufgrund der Fallzahlen in den einzelnen Antwortkategorien nicht immer möglich.

Bei einer differenzierten Betrachtung des Wechselwunsches lassen sich für die Haushaltsgröße und das Vorhandensein von Kindern, das Einkommen sowie die Anzahl der Autos im Haushalt statistisch hoch signifikante Unterschiede aufzeigen. Am deutlichsten diskriminierend wirkt jedoch die Einstellung zum Auto, ermittelt über Fragen zur Assoziation von Fahrspaß und Autofahren sowie anhand der Frage, ob die Probanden den Alltag ohne Auto gestalten könnten. Auch die Art des Wohnortes bewirkt deutliche Unterschiede im Antwortverhalten: so antworten beispielsweise Bewohner ländlicher Kreise weniger ablehnend als Großstadtbewohner. Geschlecht, Bildungsstand oder Erwerbsstatus hingegen wirken sich nicht statistisch signifikant auf das Antwortverhalten aus; dies gilt auch für den wahrgenommenen Parkdruck am Wohn- oder Hauptbezugsort. Differenziert nach den Nutzungsszenarien sind eine höhere Skepsis bei Frauen gegenüber dem Vehicle-on-Demand hervorzuheben sowie starke Unterschiede im Antwortverhalten gegenüber dem Valet-Parken in Abhängigkeit vom Vorhandensein von Kindern, von der Haushaltsgröße und vom Einkommen.

Die Teilnehmer wurden darüber hinaus für je ein Szenario gefragt, wie sich ihrer Meinung nach die Nutzung eines autonomen Fahrzeugs auf ihre bisherige Verkehrsmittelnutzung auswirken würde. Die Antworten erfolgten dabei für jedes bisherige Verkehrsmittel separat und reichten von „viel seltener“ (-2) bis hin zu „viel häufiger“ (+2). Auffallend ist auch hier der große Prozentsatz derjenigen, die nicht von einer Änderung ihres Verhaltens ausgehen: Mit Ausnahme des Taxis und des konventionellen Pkw geben stets zwischen 50 und 64 Prozent der Befragten an, keine Änderung in ihrer Verkehrsmittelnutzung vorauszusehen. Die jeweiligen Mittelwerte der gegebenen Antworten für die einzelnen antizipierten Verlagerungswirkungen sind in Tab. 12.1 darstellt. Ein Mittelwert von 0 ist dabei als Indifferenz zu werten. Die Taxinutzung wird in allen Szenarien als rückläufig eingeschätzt. Bemerkenswert ist, dass das Valet-Parken die stärksten Wechselassoziationen bewirkt – insbesondere bei der Taxinutzung liegt der Mittelwert der Antworten mit -0,78 sehr niedrig.

Tab. 12.1 Auswirkung der Szenarien auf die bisherige Verkehrsmittelnutzung

Szenario	Ich würde ... mit öffentlichen Verkehrsmitteln fahren.	Ich würde ... mit dem Rad oder zu Fuß unterwegs sein.	Ich würde ... mit dem Zug unterwegs sein.	Ich würde ... mit dem Taxi fahren.	Ich würde ... mit einem konventionellen Pkw fahren.
Autobahnpiilot	-0,36	-0,28	-0,35	-0,70	0,04
Valet-Parken	-0,44	-0,28	-0,51	-0,78	-0,32
Vollautomat	-0,33	-0,11	-0,41	-0,74	-0,23
Vehicle-on-D.	-0,33	-0,15	-0,35	-0,78	-0,13

Mittelwerte der Antwortoptionen -2 viel seltener; -1 seltener; 0 gleich häufig; 1 häufiger; 2 viel häufiger

12.5.2 Worin sehen die Befragten den spezifischen Vorteil der autonomen Fahrzeuge?

Eine weitere Frage untersucht, bei welchen Einsatzzwecken oder Wegeigenschaften sich die Probanden einen Einsatz autonomer Fahrzeuge als besonders hilfreich vorstellen. Die Mittelwerte der Antworten sind in Tab. 12.2 dargestellt. Dass die Unterschiede zwischen den Szenarien mit Ausnahme der Begleitwege stets hoch signifikant sind, kann als Zeichen gewertet werden, dass die Probanden klare Unterscheidungen zwischen den Szenarien vornehmen können. Auffallend sind die vergleichsweise hohen Zustimmungswerte des Vollautomaten auf langen (Überland-)Wegen und Reisen, in geringerem Maße auch bei höheren Besetzungsgraden. Das Valet-Parken wird insbesondere im städtischen Kontext sowie bei Transportaufgaben als hilfreich eingestuft.

Bei einer differenzierten Betrachtung fällt auf, dass männliche Antwortpersonen statistisch signifikant für alle Wegezwecke höhere Zustimmungsraten für das Vehicle-on-Demand angeben; bei Arbeits- und weiten Wegen gilt dies auch für den Autobahnpielen. Auch lässt sich zeigen, dass der Bildungsstand, gemessen am Vorhandensein des Abiturs, signifikante Auswirkungen auf die Einstellung zum Vehicle-on-Demand auf weiten (Überland-) Wegen, Reisen und bei Wegen in Begleitung aufweist. Die Anwesenheit von Kindern im Haushalt wirkt sich signifikant positiv auf die empfundene Nützlichkeit des Vollautomaten bei Fahrten in die Stadt sowie über Land aus. Bei Bringwegen konnte hingegen kein Zu-

Tab. 12.2 Konstatierte Antworten der Befragten, bei welchen Wegen sie ein solches Fahrzeug besonders hilfreich fänden

	Autobahn- pilot	Valet- Parken	Vollauto- mat	Vehicle-on- Demand
...wenn ich zur Arbeit oder zur Aus- bildung fahre.	-1,0	-0,4	-0,2	-0,6
...wenn ich einkaufen fahre oder Erledigungen nachgehe.	-1,2	0,2	-0,3	-0,4
...wenn ich Personen bringe oder abhole.	-0,8	-0,4	-0,1	-0,5
...wenn ich zur Freizeitgestaltung fahre.	-0,8	-0,4	-0,4	-0,7
...wenn ich Reisen oder Ausflüge unter- nehme.	0,1	-0,1	0,4	-0,2
...wenn ich lange unterwegs bin.	0,4	-0,2	0,8	0,2
...wenn ich in Begleitung bin.	-0,4	-0,4	0,0	-0,4
...wenn ich in der Stadt unterwegs bin.	-1,1	0,5	-0,1	-0,4
...wenn ich über Land fahre.	-0,4	-1,0	0,3	-0,3
...wenn ich Gepäck dabei habe.	-0,9	0,3	-0,4	-0,5

Mittelwerte der Antwortoptionen -2 viel seltener; -1 seltener; 0 gleich häufig; 1 häufiger; 2 viel häufiger

sammenhang festgestellt werden. Bei weiten Wegen und Fahrten in die Stadt zeigen sich für das Valet-Parken Antwortunterschiede in Abhängigkeit von der Haushaltsgröße sowie der Anwesenheit von Kindern. Der Erwerbsstatus² bedingt fast ausschließlich beim Valet-Parken Unterschiede in den Antworten auf Arbeitswegen, weiten Wegen sowie Freizeitwegen; bei letzteren gilt dies zusätzlich auch für die Einkommenshöhe.

12.5.3 Was machen wir heute und zukünftig unterwegs?

Die Möglichkeit, während der Fahrt einer anderen Betätigung nachgehen zu können, zählt zu den hauptsächlichen Eigenschaften des automatisierten Fahrens aus Nutzungssicht. Gleichzeitig stellen Zeitkosten einen Haupttreiber der Verkehrsmittelwahl in Modellen dar. Abschließend soll daher ein Blick auf Ergebnisse der Befragung hinsichtlich der bisherigen und vielleicht auch zukünftigen Zeitznutzung geworfen werden.

Die Probanden wurden zunächst gefragt, welchen Beschäftigungen sie in der Regel bei Fahrten mit dem öffentlichen Nahverkehr, der Bahn oder dem Auto nachgehen. Die mit Abstand meistgenannten Betätigungen im öffentlichen Verkehr sind der Genuss der Landschaft und der Fahrt: 50 Prozent der Befragten geben an, dies im ÖV häufig oder immer zu tun, in der Bahn 66 Prozent. Ähnlich beliebt ist die Unterhaltung mit Begleitpersonen oder anderen Passagieren (ÖV: 42 Prozent, Bahn: 49 Prozent). Es folgen das Hören von Musik, Lesen oder die Entspannung als oft genannte Tätigkeiten. Rund 77 bzw. 69 Prozent der Befragten geben an, nie im Nah- oder Fernverkehr zu arbeiten; knapp 6 bzw. 8 Prozent arbeiten häufig oder immer. Die Antworten zur Arbeit unterwegs unterscheiden sich insbesondere im Zug statistisch signifikant nach Geschlecht, Einkommen, Bildungsstand, Haushaltsgröße sowie dem Vorhandensein von Kindern im Haushalt. So geben 74 Prozent der Frauen und 63 Prozent der Männer an, im Zug nie zu arbeiten; die Wahrscheinlichkeit, im Zug häufig oder immer zu arbeiten, verdoppelt sich bei einem Nettohaushaltseinkommen von über 2600 Euro gegenüber der Vergleichsgruppe auf rund 10 Prozent.

Momentane Hauptbetätigung im Pkw ist naturgemäß die Konzentration auf die Fahrt und die Route. Rund 80 Prozent hören dabei häufig oder immer Musik; rund zwei Drittel unterhalten sich, über die Hälfte der Befragten genießt unterwegs häufig oder immer die Fahrt und die Landschaft. 7 Prozent der Befragten geben an, manchmal im Auto zu arbeiten.

Betrachtet man die von den Befragten wahrgenommenen besonderen Vorteile autonomen Fahrens im Hinblick auf die Möglichkeit einer alternativen Zeitznutzung während der Fahrt, so werden vor allem die Möglichkeit zur Unterhaltung sowie des Landschaftsgenusses genannt – den bereits jetzt liebsten Beschäftigungen im Auto. Exemplarisch sind in Abb. 12.2 die Antworten zum vollautomatisierten Fahrzeug dargestellt. Auffallend ist der geringe Anteil derjenigen, die einen Vorteil in der Möglichkeit sehen, unterwegs arbeiten zu können; beim Autobahnpiloten ist es weniger als ein Viertel der Befragten.

² Beim Erwerbsstatus wurde zwischen Vollzeit-, Teilzeit- sowie sonstiger Beschäftigung unterschieden.

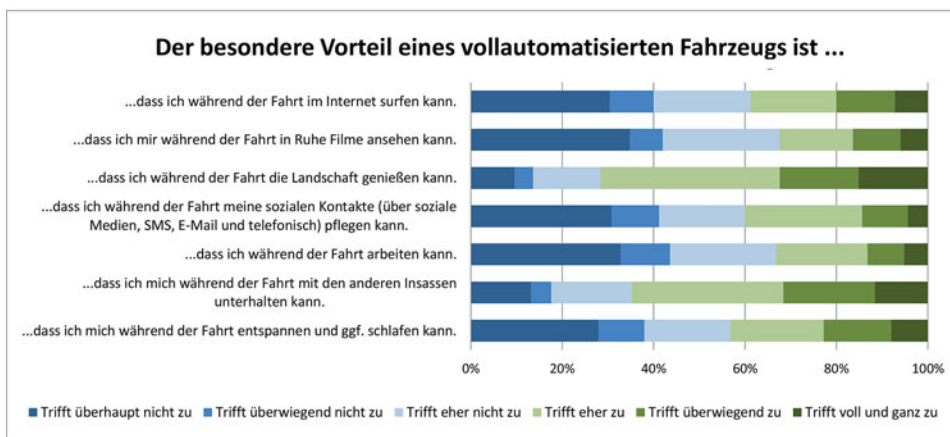


Abb. 12.2 Konstatierte Vorteile des vollautomatisierten Fahrzeugs

12.6 Autonome Fahrzeuge in der Nachfragemodellierung: Möglichkeiten und Grenzen einer Integration

Die Analyse der möglichen Wirkungen der einzelnen Nutzungsszenarien zeigt deutlich die Notwendigkeit einer Differenzierung bei der Integration autonomer Fahrzeuge in die Nachfragemodellierung auf. Während es sich sowohl beim Autobahnpielen als auch bei der Funktion des Valet-Parkens in weiten Teilen um spezielle, temporär beschränkte Sonderformen eines ansonsten weitgehend gleich bleibenden Autofahrens bzw. Fahrzeugs handelt, ist mit der Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge ein quasi neues Verkehrsmittel oder mit der Einführung einer Vehicle-on-Demand-Flotte möglicherweise ein komplett neuartiges Mobilitätsangebot verbunden.

Die sicherlich größte Herausforderung bei der Abbildung autonomen Fahrens in der Nachfragemodellierung besteht darin, eine stärkere Differenzierung des Individualverkehrsmittels „Auto“ zu ermöglichen. Der klassischen Beschreibung dieser Verkehrsmitteloption anhand der Hauptkriterien Fahrzeit- und Nutzungskosten sowie einer oftmals nicht weiter spezifizierten Präferenz der Entscheidenden mangelt es vor allem an der Möglichkeit, die Rolle des Fahrers und des Besitzstandes angemessen zu berücksichtigen. Unterscheidungen zwischen Fahren und Gefahren werden, dem Fahren des eigenen oder eines beliebigen Fahrzeuges sind Voraussetzung einer adäquaten Abbildung. Nur so ist es möglich, sowohl die Rolle des Fahrers von der des Beifahrers oder des vom Vollautomaten Chauffierten zu unterscheiden. Ebenso notwendig ist eine Differenzierung zwischen dem klassischen Pkw, einem vollautonomen Fahrzeug, einem Taxi oder einem geliehenen Vehicle-on-Demand. Der Wunsch einer Integration autonomer Fahrzeuge in die Modellierung geht somit direkt einher mit der Notwendigkeit, die einzelnen zur Verfügung stehenden Alternativen differenzierter beschreiben zu können. Gerade die fließenden, vom Nutzer

und seiner Fahrt abhängigen Übergänge vom Fahrer zum Quasi-Beifahrer beim Autobahnpiloten und beim Vollautomaten stellen hier eine besondere Herausforderung dar.

Die Reisezeit ist einer der einflussreichsten Treiber der Verkehrsmittelwahl in bestehenden Verkehrsmodellen. Bei der Modellierung des öffentlichen Verkehrs wird häufig zwischen der *Onboard*- oder eigentlichen Reisezeit, der Wartezeit sowie den Zugangs- und Abgangszeiten unterschieden, sodass auch unterschiedliche Bewertungen der Zeitkomponenten möglich sind. Bisher erfolgt jedoch weder hier noch bei anderen Verkehrsmitteln eine vertiefte Betrachtung der im Fahrzeug verbrachten Zeit. Die mit der Einführung autonomer Fahrzeuge verbundenen Erwartungen, die Zeit im Fahrzeug subjektiv sinnhafter verbringen zu können, zeigt daher deutlich die Notwendigkeit einer Unterscheidung in den Modellen auf. Die Distanz bzw. Dauer der Fahrt und damit auch der potenziell nutzbare Fahrtenanteil rücken hier ebenso in den Fokus wie die Frage, welche alternativen Betätigungen angestrebt werden oder mit wem die Fahrt durchgeführt wird.

Doch nicht nur die Zeit im Fahrzeug ist Änderungen unterworfen, besteht doch die auffälligste vom Valet-Parken bedingte Änderung in einer Verringerung des Nutzungsaufwandes am Anfang und am Ende der Fahrt. Gleiches gilt für das Vehicle-on-Demand. Auch hier zeigt sich die Notwendigkeit, die in den Modellen oftmals sehr pauschale Betrachtung der mit der Wahl eines Verkehrsmittels einhergehenden Reisezeit weiter zu differenzieren. Als konkrete Beispiele seien hier die Wartezeiten auf ein Taxi oder die Zugangszeiten zum eigenen oder geliehenen Pkw genannt.

Ein Aspekt, der sich in vereinfachter Form durch eine Modifikation der Reisezeiten vergleichsweise leicht in die Modelle integrieren lässt, besteht in der Verkürzung der Reisezeiten, die sich direkt aus dem Fehlen von Staus oder störenden Parksuchverkehren ergeben könnte. Problematischer ist die zumeist fehlende Abbildung der Wirkung einer Verlässlichkeitssteigerung der zeitlichen Prognosen von Reisezeiten auf die Bewertung des Pkw als Verkehrsmittelalternative. Die Komfortsteigerung, die sich aus neuen Funktionen wie dem Valet-Parken oder dem Autobahnpiloten ergeben, der eventuelle Sicherheitsanstieg oder auch die erhöhte Flexibilität der Fahrzeugausstattung sind weitere Beispiele relevanter subjektiver Kriterien, die bei der bisherigen Betrachtung der Verkehrsmittelwahl kaum Berücksichtigung finden. Die Problematik, subjektive Aspekte zu erfassen, in ihrer Wirkung zu quantifizieren und bei der Verkehrsmittelwahl als Faktoren zu berücksichtigen, gilt jedoch nicht nur für die Eigenschaften der Verkehrsmittel, sondern mindestens ebenso für die Beschreibung der Nutzer. Insbesondere der empfundene Fahrspaß, das Empfinden des eigenen Fahrvermögens, die Bereitschaft zur Abgabe der Fahrfunktion, die Aversion gegenüber einem etwaigen Kontrollverlust oder das Vertrauen in die Technik sind Beispiele von Faktoren, die gerade bei autonomen Fahrzeugen verstärkte Relevanz bei der Beurteilung erlangen (s. Kap. 29) und somit vermehrt in den Fokus der Modellierung rücken sollten.

Die Identifikation von Nutzergruppen, die sich hinsichtlich ihrer Bewertung verschiedener Verkehrsmitteloptionen unterscheiden, ist eines der wichtigsten Fundamente zur Beschreibung der Personen in den Modellen. Sowohl die literaturbasierten Wirkungsanalysen als auch die Ergebnisse der Befragung weisen deutlich darauf hin, dass sich die realen oder wahrgenommenen Vorteile autonomer Fahrzeuge nicht nur je nach Szenario,

sondern auch je nach Einstellungen und soziodemografischen Eigenschaften unterscheiden. Neben den klassischen Attributen Geschlecht, Erwerbsstatus, Alter und Führerschein zeigten sich je nach Nutzungsszenario vor allem die Haushaltsgröße, das Vorhandensein von Kindern im Haushalt, das Bildungsniveau sowie das Haushaltseinkommen als relevante Unterscheidungsfaktoren. Im Zuge einer Abbildung autonomer Fahrzeuge wäre hier sicherlich eine Erweiterung der in den Modellen verwendeten Attribute zur Beschreibung der Personen, vor allem aber auch des Haushaltskontextes zu diskutieren. Darüber hinaus gilt auch hier, dass die Berücksichtigung von Einstellungsfaktoren wie die Haltung gegenüber verschiedenen Verkehrsmitteln, Routinen oder auch zeitliche Eingebundenheit kaum erfolgt.

Für die Verkehrsmittelwahl besonders relevante Personen- und Haushaltsattribute sind der Besitz eines Führerscheins sowie der Zugang zu einem Pkw, in der Regel ausgedrückt durch die Anzahl der Pkw im Haushalt oder auch die tatsächliche Verfügbarkeit am Stichtag der Verhaltenserhebung. In der makroskopischen Modellierung handelt es sich bei der Pkw-Verfügbarkeit um das gängige Kriterium, anhand dessen die Nutzersegmentierung vorgenommen und die Aufkommensraten bestimmt werden. Bei der Verkehrsmittelwahl selbst wird dann von einer generellen Verfügbarkeit des Pkw ausgegangen. Mikroskopische Verkehrsmodelle erlauben es, neben dem Führerscheinbesitz auch die Beschränkungen der tatsächlichen Verfügbarkeit des Pkw zur Wahlsituation zu berücksichtigen – sei es durch Nutzungskonkurrenz im Haushalt oder vor allem im Verlauf der Wegeketten. Systeme wie das Vehicle-on-Demand brechen diese Verfügbarkeitsbeschränkung systematisch auf – diese Art von Pkw kann theoretisch jederzeit von jeder Person als neue Verkehrsmitteloption gewählt werden. Ebenso wie bei der Abbildung von Carsharing-Systemen gilt es hier also nicht zuletzt, die räumlichen und sozialen Kriterien der Pkw-Verfügbarkeit bei der Modellierung zu überdenken.

Die Berücksichtigung von Raum- und Kontexteigenschaften sowie die Differenzierung der möglichen Einsatzzwecke oder Wegezwecke waren in Abschn. 12.3.2 als weitere Kriterien der Verkehrsmittelwahl in den Modellen aufgeführt worden. Insbesondere beim Nutzungsszenario des Valet-Parkens erschließt sich intuitiv die hohe Bedeutung des Raumes für die wahrgenommene Nützlichkeit der Option. Zwar ist der Detaillierungsgrad in den Nachfragemodellen in der Regel hoch genug, um Aussagen über die Siedlungsstruktur, die generelle Flächennutzungsstruktur oder auch die Bebauungsdichte treffen zu können. Die Bebauungsstruktur – nicht zuletzt ausschlaggebend dafür, ob genügend oder gar private Stellplätze vorhanden sind – ist in der Regel nicht abgebildet. Detaillierte Abbildungen der Verfügbarkeit von Parkplätzen, des Parkdruckes oder auch der damit assoziierten Kosten sowie der Zugangs- und Abgangszeiten stellen eine Seltenheit dar (s. Abschn. 12.3.2). Für eine adäquate Abbildung des Valet-Parkens lässt sich hier generell Handlungsbedarf feststellen.

Das Vehicle-on-Demand ist ebenfalls ein Beispiel, in dem die Raumstruktur maßgeblich über die Nutzung und die Konkurrenzsituation zu bestehenden Verkehrsmittelangeboten bestimmt wird. So gilt es im städtischen Raum vornehmlich als Alternative zum privaten Pkw, dem Taxi oder dem öffentlichen Verkehr, im ländlichen Raum wird es vor allem als

möglicher Zubringerdienst und somit als Ergänzung zum Angebot des öffentlichen Verkehrs gesehen. Die Aufgabe der Modellierung ist es somit, sinnvolle Umsetzungskonzepte und Verfügbarkeiten zu antizipieren und in die Abbildung des intermodalen Verkehrsangebotes zu integrieren. Weitere erstrebenswerte Verbesserungen bei der Abbildung des Verkehrsangebotes betreffen die Abbildung der Parksuchverkehre sowie die Identifikation der Streckenabschnitte, die vorrangig für den Einsatz entsprechender Automatisierungen geeignet sind.

Insbesondere das Nutzungsszenario des Vehicle-on-Demand macht deutlich, welche grundsätzlichen Auswirkungen autonome Fahrzeuge auf unseren Fahrzeugbesitz und damit unsere alltäglichen Mobilitätsentscheidungen haben könnten. Der Abbildung und Quantifizierung kausaler Zusammenhänge zwischen dem Besitz oder der Zugangsoption zu einem Fahrzeug und seinen wichtigsten Eigenschaften – beispielsweise Ausstattung mit Valet-Parken oder einer vollautomatischen Fahrfunktion – einerseits und den angebotsseitigen, räumlichen und soziodemografischen Eigenschaften des jeweiligen Haushaltes andererseits kommt damit eine verstärkte Bedeutung zu. Zwar wird die klassische Herangehensweise, lediglich den Besitz eines Durchschnittsautos als Eingangsgröße in die Modelle zu berücksichtigen, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Emissionsberechnung mehr und mehr durch vorgelagerte Modelle abgelöst, indem Antriebsart, Größenklasse, Preissegment, Anzahl der Sitzplätze oder Transportmöglichkeiten der in den Haushalten verfügbaren Pkw einbezogen werden. Unterstützungsfunktionen wie das Valet-Parken spielen dabei aber ebenso wenig eine Rolle wie die Alternative einer Carsharing-Mitgliedschaft oder die Abschaffung eines Pkw aufgrund einer guten Versorgung mit Verkehrsmittelalternativen. Doch nicht nur die Frage, wer den Besitz eines eigenen Autos durch das Leihen oder das Gefahrenwerden substituieren könnte, bleibt so mit den herkömmlichen Mitteln der Modellierung unbeantwortet. Ist davon auszugehen, dass insbesondere die Kombination aus eigenem Pkw und verschiedenen Vehicles-on-Demand eine flexible Anpassung des eingesetzten Fahrzeuges auf die jeweilige Nutzungssituation fördert, so zeigt sich auch hier dringlicher Bedarf bei der Erhebung entsprechender Daten, ihrer Analyse und der nachfolgenden Erweiterung der Modellierung.

12.7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wird allgemein erwartet, dass autonome Fahrzeuge unterschiedlicher Ausprägung in naher Zukunft Teil unserer Alltagsmobilität sein werden. Die Integration entsprechender Verkehrsangebote in die Verkehrsmodellierung, eines der wichtigsten Instrumente der Planungspraxis, stellt daher gleichermaßen Notwendigkeit und Herausforderung dar: Bestehende empirische Arbeiten zu den erwarteten Auswirkungen zeigen sich bisher vorrangig technikorientiert; gleichzeitig ist der Blick in die Zukunft naturgemäß unsicherheitsbehaftet und die Wirkungsweise neuer Technologien nur schwer abzuschätzen.

Betrachtet man die einzelnen Nutzungsszenarien hinsichtlich ihrer möglichen Wirkungen auf die Verkehrsmittelwahl, so zeigt sich deutlich die Notwendigkeit der Differenzierung.

Sowohl das Valet-Parken als auch der Autobahnpilot werden vorrangig mit einem geringfügig modifizierten „normalen“ Pkw verbunden, der in speziellen Situationen einen Vorteil bietet: beim Valet-Parken der verbesserte Zugang zum Pkw bzw. der Wegfall der Parkplatzsuche, beim Autobahnpiloten die optionale Abgabe der Fahrfunktion auf ausgewählten Strecken oder in speziellen Fahrsituationen. Mit der Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge verbindet sich die Vorstellung einer substanziellen Verbesserung der Bewertung der Reisezeit im Fahrzeug und einer gleichzeitigen Senkung der Hindernisse für die Nutzung des Pkw. Tiefgreifende Auswirkungen auf das Gesamtverkehrssystem lassen sich vor allem für das Szenario einer weitreichenden Verfügbarkeit von Vehicles-on-Demand aufzeigen: Individualmobilität wird unabhängig von der Fahrertüchtigung oder dem Besitz eines Fahrzeuges möglich. Voraussichtlich wird dieses fahrerlose Carsharing in Städten neben einer deutlichen Senkung des Pkw-Besitzes zu einer Reduktion der Bringwege und der Taxinutzung führen; auf dem Land könnte es neue Zugänge zum öffentlichen Verkehr erschließen.

Mithilfe einer Onlinebefragung wurde untersucht, ob bzw. im Austausch gegen welche bisher genutzten Verkehrsmittel sich die Befragungsteilnehmer vorstellen könnten, ein autonomes Fahrzeug in der Form verschiedener Nutzungsszenarien zu nutzen. Neben einer generellen, mit der Konkretisierung in den einzelnen Szenarien sogar steigenden Nutzungsskepsis ist der große Einfluss der momentanen Einstellung zum Auto auffallend. Besonders starke Nutzungsrückgänge werden für das Taxi antizipiert. Spezifische Vorteile autonomer Fahrzeuge werden vor allem bei langen Fahrten und im Falle des Valet-Parkens im städtischen Kontext gesehen. Der Genuss der Fahrt und der Landschaft sowie die Unterhaltung mit Mitfahrenden sind momentan die bevorzugten Tätigkeiten in Nah- und Fernverkehr; mehr als zwei Drittel geben an, nie unterwegs zu arbeiten. Während der Autofahrt gehören das Musikhören und die Unterhaltung zu den am weitesten verbreiteten Aktivitäten. Bei der Frage nach der zukünftigen Zeitznutzung beim automatisierten Fahren stehen auch hier Landschaftsgenuss und Unterhaltung im Vordergrund der Nennungen.

Nicht alle Faktoren, die sich als maßgeblich für die Bewertung autonomer Fahrzeuge erweisen, lassen sich in Verkehrsmodellen mit ihrer vereinfachten Darstellung der Kausalzusammenhänge bei der Verkehrsentstehung abbilden. Insbesondere nicht-rationale, „weiche“ Wahrnehmungs- und Bewertungsfaktoren wie der Fahrspaß oder aber der Wunsch bzw. die Ablehnung, die Fahraufgabe abzugeben, lassen sich empirisch nur schwer und aufwendig fassen und in Modellen berücksichtigen. Sowohl die empirische Basis als auch die modellseitige Umsetzung zeigen hier Erweiterungsbedarf und -potenziale.

Die hauptsächliche Herausforderung bei der Integration autonomer Fahrzeuge liegt jedoch in der bisher nur rudimentären Unterscheidung des „Autos“ in den Modellen. Auch hier gilt es, empirische Grundlagen ebenso wie die Abbildungsmöglichkeiten in den Modellen zu verbessern und gleichzeitig die Rolle der Fahraufgabe und des Fahrzeugbesitzes bei der Verkehrsmittelwahl zu unterstreichen. Ziel ist, eine deutlichere Unterscheidung zwischen Fahren und Gefahrenwerden, einem vollständig automatisierten und einem nur bei Wunsch unterstützenden Fahrzeug, dem eigenen und einem geliehenen Pkw oder auch einem Taxi zu ermöglichen. Hier offenbart sich zeitgleich die Notwendigkeit, Fahrzeugbesitz als feste Inputgröße in der Modellierung zu überdenken.

Die Möglichkeit einer geänderten Zeitnutzung ist neben der Sicherheit einer der meistgenannten Vorteile einer Automatisierung des Fahrens. Gleichzeitig wirken Zeitkosten als Haupttreiber bei der Verkehrsmittelwahl in Verkehrsnachfragemodellen. Modellseitig ist bisher allerdings in der Regel keine Unterscheidung der Reisezeit vorgesehen. Unterscheidungen zwischen „sinnvoll“ und „nutzlos“ verbrachter Zeit, zwischen aktivem Fahrspaß oder lästigem Staustehen, zwischen produktiver Arbeit oder entspannendem Musikhören sind derzeit nicht möglich. Eine derartige Erweiterung der Modelle ist im Prinzip nicht schwierig – zunächst unabhängig davon, welche Alternativbetätigung tatsächlich angestrebt wird. Doch wird erneut deutlich, dass die empirische Basis, auf der die Modellierung aufbaut, zu große Lücken aufweist, um eine adäquate Abbildung automatisierten Fahrens gewährleisten zu können.

Literatur

1. Autoscout 24: Unser Auto von morgen: Studie zu den Wünschen der Europäer an das Auto von morgen. (2012)
2. Bamberg, S., Hunecke, M., Blöbaum, A.: Social context, personal norms and the use of public transportation: Two field studies. *J. Environ. Psychol.* 27, 190–203 (2007)
3. Becker, J.: Fahrplan in die Zukunft, *Süddeutsche Zeitung*, 18.1.2014, S.40. (2014)
4. Bhat, C.R., Sardesai, R.: The impact of stop-making and travel time reliability on commute mode choice. *Transp. Res. Part B Methodol.* 40, 709–730 (2006)
5. Bates, J.J.: History of Demand Modelling. In: Hensher, D.A. and Button, K.J. (eds.) *Handbook of Transport Modelling*. pp. 11–34. Elsevier (2012)
6. Buehler, R.: Determinants of transport mode choice: a comparison of Germany and the USA. *J. Transp. Geogr.* 19, 644–657 (2011)
7. Castiglione, J., Bradley, M., Gliebe, J.: *Activity-Based Travel Demand Models : A Primer*. (2014)
8. Continental: *Continental Mobilitätsstudie 2013*. (2013)
9. Cervero, R., Kockelman, K.: Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2, 199–219 (1997)
10. Davidson, W., Donnelly, R., Vovsha, P., Freedman, J., Ruegg, S., Hicks, J., Castiglione, J., Picado, R.: Synthesis of first practices and operational research approaches in activity-based travel demand modeling. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 41, 464–488 (2007)
11. Fagnant, D.J., Kockelman, K.M.: Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations. *Eno Cent. Transp.* (2013)
12. Flade, A., Wullkopf, U.: *Theorien und Modelle zur Verkehrsmittelwahl*. Darmstadt (2002).
13. Giesel, F., Lenz, B.: Wirkung von E-Car-Sharing-Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen, unveröffentlichte WiMobil-Projektpräsentation. (2014)
14. Giesel, F., Nobis, C., Lenz, B.: Carsharing as a Driver of Sustainable Urban Mobility? An Analysis of User Structure and Motivation, unveröffentlichte Präsentation auf der AAG Conference in Tampa, USA. (2014)
15. Glotz-Richter, M., Loose, W., Nobis, C.: Car-Sharing als Beitrag zur Lösung von städtischen Verkehrsproblemen. *Int. Verkehrswes.* 59, 333–337 (2007).
16. Kahneman, D., Krueger, A.B.: Development in the Measurement of Subjective Well-Being. *J. Econ. Perspect.* 20, 3–24 (2006)
17. KPMG: *Self-Driving Cars: Are We Ready?* (2013)

18. Kutter, E.: Modellierung für die Verkehrsplanung. Theoretische, empirische und planungspraktische Rahmenbedingungen. ECTL Working Paper 21, TU Hamburg-Harburg. (2003)
19. Litmann, T.: Ready or waiting? *Traffic Technol. Int.* 37–42 (2014)
20. Maier, G., Weiss, P.: Modelle diskreter Entscheidungen: Theorie und Anwendung in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften. Springer (1990)
21. Nally, M.G., Rindt, C.: The activity-based approach. In: Hensher, D.A. and Button, K. (eds.) *Handbook of Transport Modelling*. pp. 53–69. Elsevier (2012)
22. McNally, M.G.: The Four-Step Model. In: Hensher, D.A. and Button, K. (eds.) *Handbook of Transport Modelling*. pp. 35–54. Elsevier (2012)
23. Munsch, E.: Autonomes Fahren: Platz sparen mit dem Bordcomputer, <http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-05/autonomes-fahren-feldversuch-schweden>. (2014). Letzter Zugriff 28.6. 2014
24. Ortúzar, J., Willumsen, L.G.: *Modelling Transport*, 3. Auflage. Wiley, Chichester (2005)
25. Ory, D.T., Mokhtarian, P.L.: When is getting there half the fun? Modeling the liking for travel. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 39, 97–123 (2005)
26. Rinspeed: Rinspeed – Creative think tank for the automotive industry. Where the future is reality – today. <http://www.rinspeed.eu/aktuelles.php?aid=15>. (2014). Letzter Zugriff 28.6. 2014
27. Scheiner, J., Holz-Rau, C.: Travel mode choice: affected by objective or subjective determinants? *Transportation (Amst)*. 34, 487–511 (2007)
28. Scheiner, J., Holz-Rau, C.: Gendered travel mode choice: a focus on car deficient households. *J. Transp. Geogr.* 24, 250–261 (2012)
29. Schwanen, T., Banister, D., Anable, J.: Rethinking habits and their role in behaviour change: the case of low-carbon mobility. *J. Transp. Geogr.* 24, 522–532 (2012)
30. Silberg, G., Wallace, R., Matuszak, G.: Self-driving cars: The next revolution. KPMG and Center for Automotive Research. (2012)
31. Simma, A., Axhausen, K.W.: Commitments and Modal Usage: Analysis of German and Dutch Panels. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 1854, 22–31 (2003)
32. Sokolow, A.: Autonome Autos: Autobranche vs. Google, <http://m.heise.de/newsticker/meldung/Autonome-Autos-Autobranche-vs-Google-2072050.html>. (2013). Letzter Zugriff 28.6.2014
33. Steg, L.: Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 39, 147–162 (2005)
34. Train, K.E.: A comparison of the predictive ability of mode choice models with various levels of complexity. *Transp. Res. Part A Gen.* 13, 11–16 (1979)
35. Walker, J.L.: Beyond Rationality in Travel Demand Models. *ACCESS Mag.* 1, <https://escholarship.org/uc/item/1x04f3k3>. (2011). Letzter Zugriff 28.6.2014
36. Wardman, M.: Public transport values of time. *Transp. Policy.* 11, 363–377 (2004)
37. Willumsen, L.G.: Forecasting the impact of Self-Driving-Cars. What to do about them in our models and forecasts. Vortrag auf der 2013 Citilab Asia User Conference, Karon, Thailand, unveröffentlicht. (2013)

Hermann Winner, Walther Wachenfeld

Inhaltsverzeichnis

13.1 Einleitung 266

13.2 Autobahnautomat und Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer 268

 13.2.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept 269

 13.2.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept 269

 13.2.3 Auswirkungen auf das Fahrwerkskonzept 270

 13.2.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Interaktion 271

13.3 Autonomes Valet-Parken 272

13.4 Vehicle-on-Demand 272

 13.4.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept 273

 13.4.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept 274

 13.4.3 Auswirkungen auf das Fahrwerk 275

 13.4.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Schnittstelle 279

13.5 Use-Case-Gesamtbetrachtung 280

13.6 Fahrzeugübergreifende Änderungen 281

13.7 Folgekonzepte 282

13.8 Zusammenfassung und Ausblick 283

Literatur 284

H. Winner (✉)
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
winner@fzd.tu-darmstadt.de

W. Wachenfeld
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
wachenfeld@fzd.tu-darmstadt.de

13.1 Einleitung

Nach der Erfindung des Automobils durch Carl Benz im Jahr 1886 haben sich zum Teil sehr unterschiedliche Fahrzeugkonzepte gebildet. Einiges ist als konsequente Weiterentwicklung und Ablösung vorheriger Konzepte zu sehen, wie die Abkehr vom Kutschen-Design und die Integration der Räder und des Fahrwerks unterhalb der Karosserie oder die selbsttragende Karosserie. Als Haupteinfluss auf das Fahrzeugkonzept kann der Einsatzzweck betrachtet werden, der besonders deutlich wird, wenn Nutzkraftfahrzeuge mit einbezogen werden. Aber auch im Bereich der Personenkraftwagen hat sich eine Vielfalt entwickelt, von Lifestyle geprägten Cabrios und SUV bis hin zu Allzweckfahrzeugen mit Stufen- und Fließheck sowie Kombis und (Mini)Vans. Der Nutzungszweck steht bei Kleinlieferwagen, Kleinbussen und auf anderen Märkten bei den sogenannten Light-Trucks noch stärker im Vordergrund. Unter der Haube haben sich die Antriebskonzepte nach einer Dominanz von Verbrennungskraftmaschinen, zumeist in Form von längseingebauten Motoren mit Hinterradantrieb, in den letzten Dekaden zu einem immer größeren Teil in Richtung quereingebaute Frontmotoren mit Vorderradantrieb verschoben. Weiterführend stellt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs einen aktuellen Trend dar, der durch CO₂-Vorgaben, geringere Geräuschbelastung und weitere Vorteile zukunftsfähig erscheint. Trotz aller Verschiebungen der Anteile ist ein „Aussterben“ bestehender Antriebskonzepte nicht zu erwarten, da die Divergenz der Optimierungsziele unterschiedlicher Marktsegmente diese Diversifizierung der Konzepte weiterhin tragen wird. So stellt ein ländlicher Bereich in den USA gravierend andere Anforderungen an den Antrieb als eine chinesische Großstadt.

Zu der auf dem Markt befindlichen Fahrzeugmodellvielfalt gesellt sich die Konzeptvielfalt der „Show Cars“, die auf Automobilmessen präsentiert wird. Nur in wenigen Fällen spielen Assistenzsysteme und Teilautomatisierung bei den bekannten Fahrzeugen eine konzeptändernde Rolle. Die in den letzten Jahren erkennbare Tendenz zur geringeren Übersichtlichkeit der Fahrzeuge, die durch Stylinganforderungen und/oder Anforderungen an die Steifigkeit der Karosserie begründet wird, fördert jedoch den Einsatz von kompensierenden Systemen wie Ultraschall-Einparkhilfe, Rückfahrkamera oder Surround-View-Darstellung. Zumeist besitzen Fahrerassistenzsysteme aber keine konzeptändernde Rolle, da nur wenige in der Baureihen-Serienausstattung enthalten sind. Somit verbleibt für den Fahrzeughersteller die Anforderung, das Fahrzeug so zu entwickeln, dass auch nicht ausgerüstete Fahrzeuge sicher durch den Fahrer geführt werden können. Da zudem darauf zu achten ist, dass bei teilautomatisiertem Fahren die Übernahmebereitschaft und -fähigkeit [1] beim Fahrer vorausgesetzt wird, ist nicht mit großen Änderungen gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen zu rechnen. Lediglich Konzepte, die eine Übernahme begünstigen, wie z. B. neue Mensch-Maschine-Schnittstellen für die Beauftragung einer teilautomatischen Funktion, könnten Einzug halten [2]. Frühere, aber auch noch aktuelle Drive-by-Wire-Konzepte mit alternativen Bedienelementen (vgl. [3]) beschränkten sich auf den Ersatz der Lenk- und Pedalfunktion, ohne eine Automatisierung höherer Fahrzeugführungsebenen, die zum automatisierten Fahren unverzichtbar sind, konzeptionell vorzusehen.

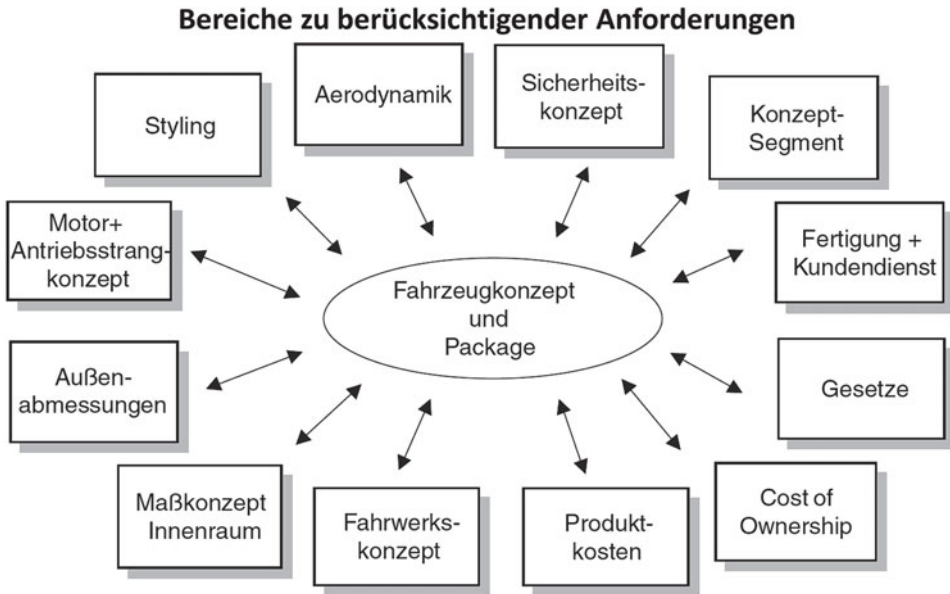


Abb. 13.1 Anforderungsbereiche für eine Konzeptentscheidung [4]

Auch wenn bisher noch kein Trend zu einem anderen Konzept aufgrund der höheren Automatisierung festzustellen ist, kann bei einer erheblichen Änderung der Fahrzeugführung dies anders aussehen. Daraus leitet sich die Frage ab: Bringt die Möglichkeit des autonomen Fahrens die aktuelle Konzeptwelt der Automobile durcheinander, sei es durch starke Verschiebung der Marktanteile oder durch neue Konzepte?

Bevor auf die Frage weiter eingegangen wird, soll eine Abgrenzung der konzeptbestimmenden Merkmale erfolgen, damit eine gleichmäßige, das Gesamtfahrzeug betreffende Ebene geschaffen wird und die nochmals vielfältigere Welt der Detaillösungen ausgeblendet werden kann. Dabei sind zuvor die Anforderungen zu identifizieren, die später die Konzeptauswahl dominieren werden.

In Abb. 13.1 ist eine Auswahl von Bereichen dargestellt, aus denen sich die Anforderungen ergeben. Viele der Anforderungen sind physikalisch – oftmals konfliktionär – verknüpft und nur über einen Abwägungs- und Priorisierungsprozess miteinander vereinbar, wie z. B. eine stromlinienförmige Aerodynamik im Gegensatz zu markanten Stylingkomponenten.

Für die hier beabsichtigte Diskussion der obersten Konzeptebene werden die Konzepte hinsichtlich

- Karosserie,
- Antrieb,
- Fahrwerk,
- Innenraum,
- Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)

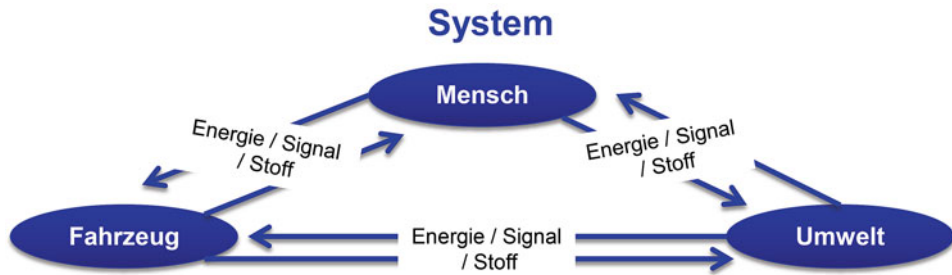


Abb. 13.2 Systembetrachtung Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

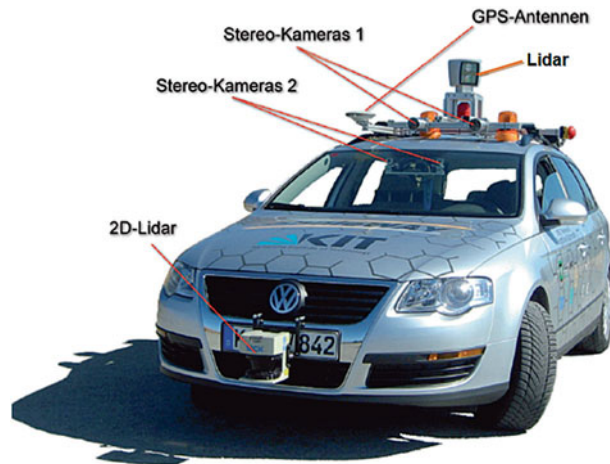
unterschieden. Als Baugruppen des Fahrzeugs stehen diese immer in einem Zusammenhang zum Insassen und der Umwelt, insbesondere dem Umfeld Straße. Die Interaktion zwischen diesen Bereichen kann abstrakt als Austausch von Stoff, Energie und Signal dargestellt werden (s. Abb. 13.2). Da die Fahrzeugautomatisierung diesen Austausch grundlegend verändert, werden auch die Baugruppen beeinflusst. Ein Beispiel der Automatisierungsauswirkung ist der Signalaustausch zwischen Umwelt und Mensch. Der Insasse muss nun nicht mehr der Fahraufgabe nachgehen und benötigt dementsprechend auch keinen Signalaustausch mit der Umwelt, um sein Fahrtziel zu erreichen. Dieser auf dem Austausch von Stoff, Energie und Signal basierende Ansatz ermöglicht eine weitere Strukturierung der Analyse unter Berücksichtigung der Schnittstellen.

Im Folgenden werden diese konzeptbestimmenden Bereiche und ihre Schnittstellen für die in Kap. 2 ausgewählten Use-Cases und die damit möglichen Anwendungsszenarien im Einzelnen betrachtet.

13.2 Autobahnavtomat und Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Obwohl sich die zwei Use-Cases „Autobahnavtomat“ und „Vollautomat“ in ihrer Leistungsfähigkeit bezüglich der autonomen Fahrt deutlich unterscheiden, lassen sich hinsichtlich der Fahrzeugkonzeptüberlegungen keine Unterschiede finden, da beide Use-Cases an einen Verfügbarkeitsfahrer gebunden sind. Beim Use-Case „Vollautomat“ kann der Einsatzbereich der autonomen Fahrt ausgedehnter sein und verlangt seltener eine Übernahme. Aber in beiden Fällen muss gewährleistet sein, dass eine Fahrzeugführung durch einen fahrberechtigten Menschen in seiner Funktion als Verfügbarkeitsfahrer ohne Einschränkung möglich ist. Damit ist für beide Fälle die Fahrzeugführung als „Mischbetrieb“ – autonom oder manuell – zu unterstützen.

Abb. 13.3 Umfeldsensorik Versuchsfahrzeug Team Anyway [5]



13.2.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept

Für die weiterhin vorgesehene manuelle Fahrzeugführung ist keine konzeptbestimmende Änderung gegenüber den zu erwartenden Vergleichskonzepten, die keine Fähigkeit zum autonomen Fahren vorsehen, erkennbar. Solange das sogenannte Erweiterungs- und Verfügbarkeitskonzept (s. Kap. 2) auf der Regelung durch den Fahrer basiert, beschränkt dies die Freiheitsgrade des Karosseriekonzepts. Die Außenmaße des Fahrzeugs sowie die Anordnung und Größen der Scheiben müssen dann auch weiterhin dem Fahrer angepasst werden, sodass entsprechend ähnliche Ausführungen wie heutzutage erwartet werden.

Als Voraussetzung für das autonome Fahren ist eine Sensorik für nahezu alle Sichtrichtungen gefordert, die sicherlich zu im Detail aufwendigen Package-Lösungen führen mag, wenn wie bisher eine nur dezente Sichtbarkeit angestrebt wird. Sollte tatsächlich ein Zeichen für die Fähigkeit, autonom zu fahren, gesetzt werden, so käme das den Entwicklern zugute, um im wahrsten Sinne des Wortes herausragende Sensorpositionen besetzen zu können (s. als Beispiel Abb. 13.3). Ansonsten ist keine größere Abweichung des Fahrzeugkonzepts zu Vergleichsfahrzeugen zu erwarten, da mit diesen Use-Cases den bestehenden Konzepten „nur“ ein neues Feature hinzugefügt wurde, ohne die Grundbestimmung des Fahrzeugs oder des Einsatzbereiches zu berühren.

13.2.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept

Für die potenziell verbleibenden manuellen Fahrtanteile gibt es keinen Grund, das Antriebskonzept anders zu bewerten als für vergleichbare, nicht autonome Fahrzeuge. Allerdings vereinfacht die autonome Fahrt gegenüber der manuellen Fahrt eine Einbindung in die Verkehrstelematik, und somit wird eine effizientere Fahrt möglich. Die Fahrweise kann

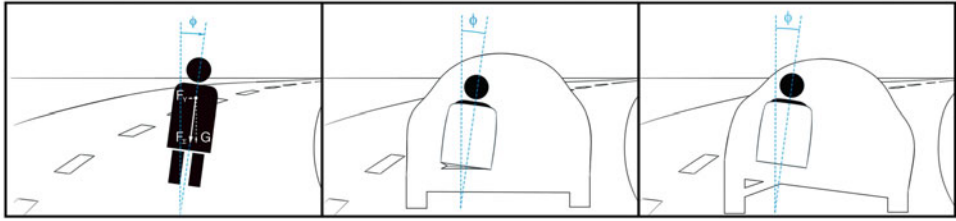


Abb. 13.4 Neigekonzept bei Kurvenfahrt: links: Addition der Kräfte, die auf Insassen wirken; Mitte: Sitzneigung; rechts: Neigung mittels Fahrwerk

je nach Zeit- oder Energiebedarf gesteuert werden. Grundsätzlich stehen diese Möglichkeiten bereits den Fahrzeugen mit Teil- oder Hochautomatisierung zur Verfügung, sodass sich kaum relevante Änderungen im Antriebskonzept wegen des weiteren Schritts zum autonomen Fahren ergeben. Es sind eher die neuen Vernetzungsmöglichkeiten, die Antriebskonzepten mit geringerer Gesamtverfügbarkeit, wie den batterieelektrischen Antrieben, zugutekommen.

13.2.3 Auswirkungen auf das Fahrwerkskonzept

Während für die manuelle Fahrt ein Fahrwerk mit üblichen Anforderungen benötigt wird, ermöglichen lange Phasen der autonomen Fahrt die Entkopplung des oder der Insassen vom Fahrgeschehen. Die Automatisierung benötigt weder das „Popometer“ für die Fahrdynamik, noch die Quer- und Längskraftwirkung, die mit der Fahrzeugbeschleunigung auf den Insassen wirkt. Sie kann auf die bewegungserfassenden Sensoren, die schon seit Langem für die elektronische Stabilitätsregelung verwendet werden, zurückgreifen, um die Trajektorie sowohl dynamisch als auch komfortabel zu regeln.

Ein Neigefahrwerk, wie im schienengebundenen Verkehr schon lange bekannt, könnte zumindest die üblichen moderaten Querbeschleunigungen von $1\text{--}2\text{ m/s}^2$ kompensieren, wozu Gesamtneigungswinkel von etwa $6^\circ\text{--}12^\circ$ benötigt werden. Dieser Gesamtneigungswinkel lässt sich durch den Neigungswinkel der Fahrbahn, den Fahrzeugaufbauwinkeln und den Sitzwinkel darstellen (s. Abb. 13.4). Für die Seitenkraftkompensation erscheint es möglich, diese allein durch das Fahrwerk zu realisieren, wie die 2014 erfolgte Markteinführung im S-Klasse Coupé-Modell von Mercedes-Benz in ersten Zügen zeigt. Die für die Längskraftkompensation notwendigen Ein- und Ausfederungen betragen hingegen mehr als das Doppelte des heutigen Ein- bzw. Ausfederwegs. Wollte man auch hier eine Kompensation im genannten Bereich erreichen, kann dies nur mit einer (alleinigen oder zusätzlichen) Sitzverkipplung realisiert werden.

So faszinierend der Gedanke einer längs- und querkraftfreien Fahrt insbesondere für Ruhezeiten auch sein mag, so problematisch wird er bei gewünschter visueller Anknüpfung des Menschen an die Umwelt werden, da dann der visuelle Eindruck nicht mehr mit dem kinästhetischen und vestibularen Eindruck übereinstimmt. Aber selbst bei visueller Ent-

kopplung kann die Drehbeschleunigung, die im Vestibularorgan sensiert wird, zu Unwohlsein führen, da sie im Gegensatz zur translatorischen Beschleunigung nicht kompensiert werden kann, sofern die Fahrgastzelle nicht gegenüber der Fahrzeugrichtung drehbar ist. Darüber hinaus ist die Neigungsverstellung nicht ohne Drehraten und -beschleunigungen durchzuführen, wodurch die Neigedynamik stark herabgesetzt wird. So wäre bei einer Wahrnehmungsgrenze für die Drehbeschleunigung (Rollen) von $4\text{ }^\circ/\text{s}^2$, wie sie aus Experimenten heraus bestimmt wurde [6, 7], der Zielwinkel für die Beschleunigungskompensation erst nach etwa 2,5 s erreicht. Dies kann bei einer sehr vorausschauenden autonomen Fahrweise ohne externe Störgrößen, wie z. B. andere Fahrzeuge, auf die mit höheren Beschleunigungsänderungen reagiert werden muss, in der Trajektorienplanung gerade noch berücksichtigt werden. Die verwendete Wahrnehmungsgrenze ist das Ergebnis eines Experiments und somit abhängig von dem zugrunde liegenden Testaufbau. Andere Experimente liefern abweichende Werte abhängig von dem entsprechenden Testaufbau, der Drehachse sowie der Testperson ($0,3\text{--}6\text{ }^\circ/\text{s}^2$). Eine Zusammenstellung unterschiedlicher Studien zu diesem Thema ist in [7, 9] zu finden.

Leichter erscheint es, die Beeinträchtigung durch vertikale Kräfte auszugleichen. In Kombination mit der Frontumfeldsensorik sollte ein Sänftengefühl möglich werden, das gegebenenfalls für sicherheitsrelevante Manöver abgeschaltet wird, um der Fahrdynamik Priorität einzuräumen. Elektronisch gesteuerte Luftfederkonzepte mit Verstelldämpfern oder vollaktive elektromechanische Feder-Dämpfereinheiten könnten die Basis für eine solche Sänfte sein. Dabei sind zur Vermeidung von niederfrequenten Nickbewegungen, ursächlich für die „Seekrankheit“, entsprechende Vorkehrungen in der Regelung zu treffen.

13.2.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Interaktion

Durch die Notwendigkeit des Verfügbarkeitsfahrers muss immer ein Fahrerarbeitsplatz zur Verfügung stehen. Daher wird die Einrichtung des Innenraums davon geprägt sein, dass in der vorderen Reihe ein instrumentierter Platz bereitsteht. Somit sind keine größeren Innenraumkonzeptveränderungen im Rahmen der hier betrachteten Use-Cases (Autobahnavtomat und Vollautomat) zu erwarten. Alternativ zur heute bekannten Fahrzeugsteuerung durch den Menschen per Lenkrad und Pedale kann ein alternatives Steuerungskonzept implementiert sein, das auf teilautomatisierte Grundfunktionalitäten aufsetzt, womit auch andere, platz sparende Bedienelemente verbunden sein können. Ansonsten findet sich bei mehreren Konzeptfahrzeugbeispielen die Möglichkeit, die Bedienelemente, im Besonderen das Lenkrad, an einen weniger störenden Platz zu bewegen, womit bei der autonomen Fahrt der Raum vor dem Fahrer für das „Alternativprogramm“ zur Verfügung steht. Eventuell ist auch eine Art Verriegelung der Betätigungselemente notwendig, damit nicht aus Versehen auf die Betätigungselemente zugegriffen wird und eine unbeabsichtigte Übernahme stattfindet.

Neben der Nutzung des Fahrerarbeitsplatzes als mobiles Büro zum Arbeiten oder als Medienplattform zur Unterhaltung ermöglicht die autonome Fahrt die Nutzung der Fahrzeit zur Erholung oder zur Kommunikation mit Mitfahrern. Entsprechend lassen Fahrzeuge bei diesem Use-Case erwarten, dass die Sitzkonzepte den jeweiligen Bedürfnissen Rechnung tragen, wobei vieles schon in heutigen Fahrzeugen, wenn auch nicht für den Fahrersitz, verwirklicht wurde.

13.3 Autonomes Valet-Parken

Das autonome Valet-Parken kann für Privat-Pkw das Parkplatzproblem im Wohnbereich oder an der Arbeitsstätte lösen helfen und für Carsharing-Nutzer die bisher als lästig empfundene Strecke vom Carsharing-Stellplatz zum gewünschten Einsteige- oder vom Aussteigeort überbrücken (s. Kap. 9). Außerhalb dieser Nutzung bleibt das Fahrzeug ein ganz „normales“ Fahrzeug, das die vorhandenen Fähigkeiten für assistierendes oder teil- bzw. hochautomatisiertes Fahren zur Verfügung stellen wird.

Wenn keine Insassen oder Gegenstände mehr in einem Fahrzeug vorhanden sind, besteht die Möglichkeit, den Freiraum im Fahrzeug durch ein variables Karosseriekonzept zu nutzen. Bereits heute existieren Konzepte mit dieser Funktion, die eine Reduktion der Ausmaße eines Fahrzeugs während des Parkens vorsehen. Allerdings sind den Autoren keine Serienanwendungen bekannt, da vermutlich die Anforderungen an eine hohe passive Sicherheit nicht mit den Anforderungen an eine variable Karosserie zusammenpassen. Das autonome Valet-Parken kann zwar durch vergünstigte Abstelltarife eine derartige platzsparende Option bevorteilen, umgekehrt aber auch den Druck auf eine platzeffiziente Unterbringung reduzieren, da der Weg zu einem großen Parkplatz ohne Kosten- und Zeitdruck nun automatisch bewältigt wird. Ob dabei der Kraftstoffverbrauch für den Weg zum Parkplatz höher ausfällt als der für den Parksuchverkehr, lässt sich im Voraus schlecht abschätzen.

Ansonsten folgen aus dem autonomen Valet-Parken keine weiteren grundlegenden Freiheitsgrade für das Fahrzeugkonzept.

13.4 Vehicle-on-Demand

Mit dem Use-Case Vehicle-on-Demand ist ein vollständig fahrerloses Fahrzeug gemeint, das keinen Fahrerarbeitsplatz zur Verfügung stellt und auf die Fahrerfähigkeiten nicht mehr zurückgreifen kann. Dadurch ergeben sich neue Freiheitsgrade für die Konzeption dieser Fahrzeuge, die im Folgenden für diesen Use-Case beschrieben werden. Da das Konzept eine Nutzung gegenüber Besitz favorisiert, ist davon auszugehen, dass die Nutzer das Fahrzeug in den meisten Fällen weder besitzen noch Halterverantwortung für das Fahrzeug übernommen haben. Stattdessen stellen Dienstanbieter diese Fahrzeuge für Mobilitätsdienstleistungen bereit (s. Kap. 9).

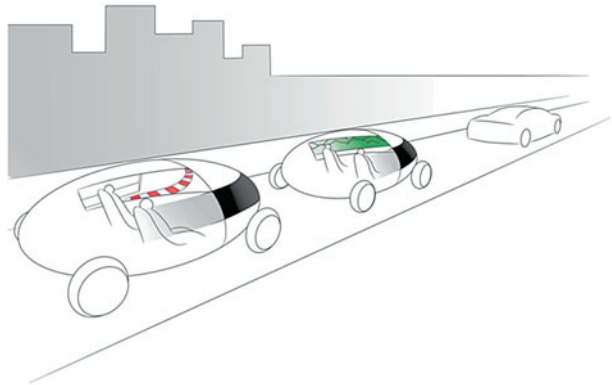
13.4.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept

Bei dem nahezu alle Einsatzbereiche umfassenden Use-Case mit Fahrgeschwindigkeiten bis zu 120 km/h muss die Karosserie den Insassen Wetter- und Aufprallschutz bieten, der dem heutiger Automobile entspricht. Damit sind maßgebliche Konzepteinschränkungen verbunden. Ein geschlossener Fahrgastraum, möglicherweise mit Cabriodach, ist aus Wetterschutzgründen nötig. Zusätzlich ist für die Passagiere des Fahrzeugs eine sichere Hülle mit Rückhaltemöglichkeit vorzusehen, um die gleiche passive Sicherheit wie in heutigen Fahrzeugen mit Sitzgurt und Airbag zu gewährleisten. Diese Forderung besteht, solange keine vollständige, unfallfreie Betriebssicherheit des Straßenverkehrs gegeben ist, was zumindest im Mischverkehr mit Driver-only-Fahrzeugen derzeit nicht absehbar ist. Die Form des Fahrzeugs kann abhängig von Zweck und Zielgruppe heutigen Automobilen entsprechen, womit eine große Vielzahl von Varianten möglich ist. Die größte Raumökonomie bieten One-Box-Cars, die einem Quader gemäß ohne Absenkungen im vorderen oder hinteren Fahrzeugbereich auskommen. Natürlich werden sich die Designer bemühen, die jeweils gewählte Form so zu präsentieren, dass die Kundschaft passend angesprochen wird. Allerdings ist bei der Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten eines Vehicle-on-Demand-Konzepts noch weitgehend offen, worauf das Styling zielen wird, insbesondere wie viel individuelle Emotionalität bedient werden muss. Ein Blick in die Historie der Straßenfahrzeuge zeigt, dass für nahezu jedes Karosseriekonzept Beispiele existieren, die als ästhetisch gelungen oder misslungen angesehen werden. Daher wird hier allein aus der Formgebung kein Trend vorhergesagt. Aber allen Fahrzeugen, deren Nutzungsbereich höhere Geschwindigkeiten als die hier angegebenen 120 km/h einschließt, werden aerodynamisch nach dem Stand der Technik geformt sein und allein schon deshalb Abrundungen sowie aerodynamisch bedingte Verjüngungen und Abrisskanten aufweisen müssen [10].

Die Hülle um die Passagiere hat neben der Schutzfunktion auch die Kopplung an die Umwelt zu übernehmen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der vollständigen Entkopplung, da keine Fahrersicht gewährleistet werden muss. Dies ermöglicht die von visuellen oder akustischen Störungen nahezu freie und private Nutzung der Kabine zu Unterhaltungs- und Erholungszwecken. Allerdings können die fahrdynamischen Einflüsse nur mit Einschränkungen isoliert werden, wie in Abschn. 13.2.3 und Abschn. 13.4.3 dargelegt wird. Es bleibt immer eine Herausforderung, die Stimmigkeit zwischen den Sinneseindrücken zu garantieren, da ansonsten Unwohlsein bis hin zur Übelkeit folgt, die kaum zur Akzeptanz solcher Isolationskonzepte führen wird. Abbildung 13.5 zeigt auf, wie eine solche vollständige Entkopplung während der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr aussehen würde.

Die Spanne der alternativen Beschäftigungen, die durch eine solche Entkopplung ermöglicht würde, ist groß und reicht vom Lesen in erholsamer „Umgebung“ (rechtes Fahrzeug) bis hin zu spannender Unterhaltung auf Rennstrecken (linkes Fahrzeug). Auch für die künstliche Darstellung der Umgebung bleibt die Herausforderung bestehen, die Stimmigkeit zwischen den Sinneseindrücken zu gewährleisten. Eine Wahlmöglichkeit über den Grad der Entkopplung über im einfachen Fall mechanisch betätigte Abdeckungen (Jalousien) oder über Hightech-Lösungen wie elektrochrome Scheiben erleichtert die

Abb. 13.5 Entkopplung der Passagiere vom realen Straßenverkehr



Kompromissfindung auf jeden Fall. Auch eine virtuelle Umweltkopplung über Kamera-Livebilder der Umgebung, die eingespielt werden können (Bildschirme, Projektion), ist denkbar, verlangt aber ein hohes Vertrauen der Passagiere in die Zuverlässigkeit der Technik. Die Fahrt in einem autonomen Fahrzeug sollte nicht mit der Furcht verbunden sein, dass man, wenn auch nur zeitweise, einer Isolationszelle ohne Umweltkontakt ausgesetzt werden könnte. Einen Mittelweg zwischen virtueller und realer Welt stellt die Anreicherung der Umweltinformation im Sinne einer „Augmented Reality“ dar, bei der z. B. kontakt-analog Hinweise auf Sehenswürdigkeiten eingeblendet werden.

13.4.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept

Allein aus dem Use-Case lassen sich keine Einschränkungen für den Antrieb ableiten. Sowohl klassische Verbrennungskraftmaschinen (VKM) als auch Elektroantriebe und deren Mischformen (Hybride) eignen sich grundsätzlich. Deren Vor- und Nachteile bleiben auch für das Vehicle-on-Demand bestehen. Diese sind einerseits Speicher- und Ladevorteile von chemischer Energie, die VKM-getriebenen Fahrzeugen eine größere Reichweite ermöglichen, und andererseits die Geräusch- und Schadstoffemissionsvorteile der Elektroantriebe, die im Besonderen in dicht bewohnten Gebieten geschätzt werden. Für ein Vehicle-on-Demand ist dafür zu sorgen, dass für die beabsichtigte Fahrt genügend Energie mitgeführt wird. Daher ist von einem Versorgungskonzept auszugehen, das in den Standzeiten die Energieaufnahme integriert. Passende Anlaufstellen werden diesen Service sowohl manuell als auch automatisiert anbieten können, sei es an herkömmlichen Tankstellen oder speziellen Stromtankstellen. Induktives Laden der Batterie bietet sich dafür in besonderem Maße an. Je nach Nutzungsgrad der Fahrzeuge fällt der Nachteil des höheren Zeitbedarfs für die Energiespeicherung bei Elektrofahrzeugen unterschiedlich aus: Sind die Standzeiten immer noch höher als die Fahrzeiten, fallen die Ladezeiten weitgehend in den Nichtnutzungsbereich und sind damit ohne hohe wirtschaftliche Belastung. Anders verhält sich das bei einem Nutzungsgrad der Fahrzeuge, der auf einen Betrieb nahezu rund um die

Uhr abzielt. Für dieses Ziel fallen die Zeiten für die Energiebereitstellung erheblich ins Gewicht, da das Aufladen von Batterien zu einem deutlich größeren Nutzungsabfall führt als das Nachtanken bei VKM-angetriebenen Fahrzeugen.

(Wasserstoff-)Brennstoffzellenantriebe werden durch Vehicle-on-Demand-Konzepte eher leichter umzusetzen sein, da ein Dienstanbieter – eventuell auch im Verbund mit weiteren Anbietern – die Tank-Infrastruktur besser in den Ablauf integrieren kann als herkömmliche Automobilnutzer. So können Abstellplätze (= Bereitschaftsplätze) und Wasserstofftankstellen sowohl örtlich als auch im Ablauf aufeinander abgestimmt werden. Auch die Routen können von vornherein auf die Verbindung zwischen Wasserstofftankstellen ausgelegt werden, sofern eine Füllung für den Mobilitätsdienst nicht ausreichen sollte. Ferner lassen sich auch unvermeidbare Verflüchtigungsverluste, die im Stand bei Wasserstoffdrucktanks auftreten, weitgehend minimieren, da die Standzeiten beim Vehicle-on-Demand bei wirtschaftlichem Betrieb sehr gering sein sollten. Trotz dieser Vorteile des Vehicle-on-Demand-Konzepts für die (Wasserstoff-)Brennstoffzellen-Technologie müssen sich beide Richtungen, also Vehicle-on-Demand sowie Wasserstoffantriebe unabhängig voneinander den Marktzugang schaffen. Eine (Zwangs-)Kopplung dieser Technologien bei Markteinführung verschlechtert die Chancen für beide, da dadurch nur eine Schnittmenge der Nutzungsmöglichkeiten zu einem beschränkten Marktvolumen führt, das zu klein ist, um für beide Technologien die Investitionen zu rechtfertigen.

13.4.3 Auswirkungen auf das Fahrwerk

Für die Kraftübertragung eines Vehicle-on-Demand werden weiterhin die Reifen zuständig bleiben, da sich weder die Vor- noch die Nachteile alternativer Konzepte (z. B. Luftkissen/Propeller, Magnetschwebeantrieb, Ketten) durch die Fahrzeugautomatisierung wesentlich verschieben. Die Anforderungen an die Fahrdynamik werden sich ebenfalls kaum ändern, und die Anforderungen an ein besonders sportliches Fahrwerk werden sich kaum im Lastenheft des Vehicle-on-Demand wiederfinden. Die Verzögerungs- und Ausweichfähigkeit (also Beschleunigung bis $\approx 10 \text{ m/s}^2$) wird gegenüber heutigen Automobilen kaum geringer ausfallen, auch wenn eine deutlich komfortablere Fahrzeugführung zu erwarten ist. Allerdings besteht bei Vehicle-on-Demand die Möglichkeit, schon prädiktiv die Manöver zu planen und dabei die Möglichkeiten der gegebenen Fahrdynamik optimal auszunutzen, wodurch sich für das Fahrwerkkonzept neue Möglichkeiten ergeben können.

Neben den zwei in den nächsten Abschnitten diskutierten Aspekten der Radanordnung und der Lenkkonzepte gelten insbesondere für Vehicle-on-Demand-Fahrzeuge, deren Einsatzzweck die Personenbeförderung auf längeren Strecken ist, die gleichen Überlegungen zur Entkopplung von der Fahrdynamik wie in Abschn. 13.2.3 beschrieben. Eine Entkopplung von der Fahrdynamik *und* der Umgebung verlangt zwar enormen technischen Aufwand, würde aber eine höhere Stimmigkeit der Sinneseindrücke ermöglichen, als wenn jeweils nur ein Teil der Eindrücke entkoppelt würde. Sollten empfindliche Güter transportiert werden, würde eine entsprechende Entkopplung ebenso nützlich sein.

13.4.3.1 Mögliche Radkonzepte für Vehicle-on-Demand

Mit Blick auf die Stabilisierungsaufgabe für einen menschlichen Fahrer ermöglicht das Vehicle-on-Demand die Auswahl eines Radkonzepts ohne Rücksicht auf aktuell geltende Anforderungen. Dieser Freiheitsgrad motiviert die erneute Bewertung existierender Konzepte mit weniger als vier Rädern für den Einsatz als Vehicle-on-Demand.

Wie Motorräder und Trikes belegen, sind auch weniger als vier Räder tauglich für Transportaufgaben. Grundsätzlich reicht sogar *ein* Rad für die Fortbewegung, wie Einradfahr(künstl)er immer wieder eindrucksvoll beweisen. Dabei kommt der Regelung der Lage des Schwerpunkts die Schlüsselrolle zu. Diese Stabilisierung könnte ein mechatronisches System übernehmen und somit nahezu jeden befähigen, ein Einrad-Fahrzeug zu bewegen. Zwei Methoden lassen sich dazu verwenden: Momentenerzeugung am Rad und Verschiebung von beweglichen Massen.

Das erste Konzept findet beim zweirädrigen Segway® PT (Personal Transporter) Anwendung [11]. Die „Gewichtsverlagerung“ über die Füße wird sensiert und dazu eine Neigung des Passagiers eingestellt, die mit der Beschleunigung zusammenpasst, sodass der resultierende Vektor aus Schwer- und Trägheitskraft immer durch die Verbindungslinie der Radaufstandspunkte geht. In gleicher Weise wird bei zwei Rädern hintereinander manövriert. Mit einem durch eine Lenkbewegung entgegen der Kurvenrichtung bewirkten Rollmoment wird eine Schräglage erzeugt, die dann den resultierenden Vektor von Zentrifugal- und Schwerkraft durch die Verbindungslinie beider Radaufstandspunkte führt. Ein Kugelantrieb könnte diese Stabilisierung grundsätzlich für beide Richtungen übernehmen. Trotzdem bleibt in starkem Maße fraglich, ob eine solche Stabilisierung im Kontext des autonomen Fahrens sinnvoll eingesetzt werden kann. Der Nutzer ist mit der Gewichtsabstützung immer stark eingebunden. Darüber hinaus sind diese Konzepte auf niedrige Geschwindigkeiten beschränkt, da vertikale Unebenheiten wie Bordsteinstufen oder Schlaglöcher sowohl die Regeldynamik als auch die Aktorleistungsfähigkeit überfordern und somit Stürze nicht verhindert werden können. Diese Überlegung trifft auch für die einachsigen Zweiräder wie das oben genannte Segway PT zu, bei Motorrädern sind diese Vertikalhindernisse nicht in der Querbewegung zu befürchten, auch wenn Phänomene wie das Lenkerschlagen (*Kickback*) die Sensitivität der Fahrzeugstabilisierung von Zweirädern deutlich macht.

Ähnlich dem Jonglieren mit den Armen bei Seiltänzern wird beim zweiten Konzept eine Masse so verschoben, dass der Schwerpunkt auch ohne Zutun der Insassen passend zur Längs- oder Querkraft verlagert wird. Zur Abstützung dieser Verlagerung werden kurzzeitig Drehmomente an den Rädern appliziert. Die Konzepte von Segway P.U.M.A. (Personal Urban Mobility & Accessibility) [12] wie auch die Umsetzung von General Motors als EN-V (Electric Networked-Vehicle) [13] werden im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren verwendet. Durch die hohe Wendigkeit (Drehen auf der Stelle) und den geringen Platzbedarf bietet sich dieses Fahrzeug – selbstverständlich nicht nur auf das autonome Fahren beschränkt – für den innerstädtischen Bereich an. Als Nachteile stehen der permanente Stabilisierungsaufwand, der einen größeren Teil der mitgeführten Energie „verbraucht“, und die o. g. Empfindlichkeit gegenüber vertikalen Stufen, wobei diese prinzipbedingt geringer ausfällt, da die bewegliche Masse hier das zur Korrektur notwendige

Antriebsmoment verringern kann. Bisherigen Aussagen zufolge ist eine Höchstgeschwindigkeit von 25 Meilen pro Stunde entsprechend 40 km/h vorgesehen. Für einen Einsatz bis 120 km/h erscheint dieses Konzept kaum geeignet.

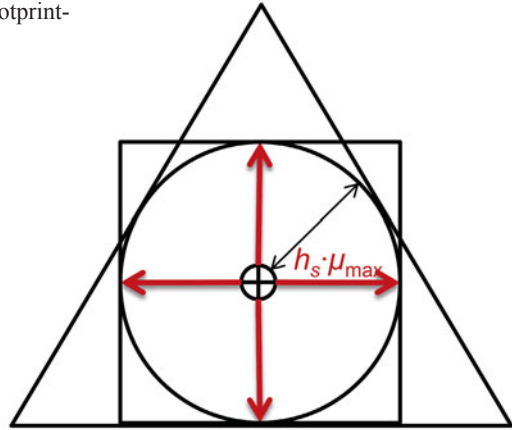
Für die klassische einspurige Zweiradanordnung mit Rädern hintereinander können ebenfalls verschiebbare Massen eingesetzt werden, wobei der Platzbedarf für die Verschiebmöglichkeit in Querrichtung schwieriger als in Längsrichtung bei einem einachsigen Zweirad zu befriedigen ist. Daher erscheint ein Lenkaktor, der das Balancieren übernehmen kann, für eine autonome Motorradführung aussichtsreicher. Allerdings bleibt fraglich, ob ein solches Konzept den Mobilitätswunsch für ein Vehicle-on-Demand erfüllen kann. Eine Vollverkleidung ist umständlich und erhöht die Seitenwindempfindlichkeit stark. Auszuschließen ist es jedoch nicht, denn zusätzlich zum Wetterschutz erhöht ein umschließender Rahmen die Sicherheit, wie der von 2000–2003 produzierte Motorroller BMW C1 demonstrierte [14]. In einer solchen Ausstattung ist ein einspuriges zweirädriges Vehicle-on-Demand denkbar, eventuell mit Stützrädern für sehr niedrige Geschwindigkeiten und den Stand ausgerüstet. Ob allerdings die besondere Mobilität von Einspurfahrzeugen, wie die Vorbeifahrt an aufgestauten Kolonnen, autonom fahrend umgesetzt werden kann, ist wieder eine andere Frage.

Eine gemeinsame Möglichkeit besitzen beide Ansätze: Sie können in einer Richtung kraftfreies Fahren liefern. Beim einachsigen Zweirad kann die Längskraft, beim einspurigen die Querkraft auf die Insassen vollständig kompensiert werden. Ob ein passiv die Fahrt erlebender Passagier dies als angenehm empfindet, ist allerdings offen.

Ab drei Rädern ist ein Fahrzeug ohne Regelung stabil, sofern der resultierende Kraftvektor aus Trägheits- und Schwerkraft die Fläche zwischen den Radaufstandspunkten umfassenden Verbindungslinien nicht verlässt. Abhängig von der Höhe des Schwerpunkts h_s und der zu berücksichtigenden Fahrdynamikgrenzen durch den maximalen Reibbeiwert μ_{max} beschreibt die Fläche des resultierenden Vektors mit der Fahrbahn einen Kreis mit dem Radius $r_{res} = h_s \cdot a_{max} / g = h_s \cdot \mu_{max}$ um den Mittelpunkt (s. Abb. 13.6). Der Mittelpunkt folgt aus der Projektion des Schwerpunkts in die x-y-Fläche der Fahrbahn. Die Fahrdynamikgrenzen ergeben sich aus den (betragsmäßigen) maximalen, auf die Erdbeschleunigung bezogenen Längs- und Querbeschleunigungen (hier als a_{max}/g für beide Richtungen gleich angenommen). Schneiden die äußeren Verbindungslinien der Radaufstandspunkte diesen Kreis, so besteht eine Kippgefahr schon im definierten Fahrdynamikbereich. Liegen sie außerhalb, so kann trotzdem unter ungünstigen Bedingungen ein Fahrzeug kippen, wie das berühmt gewordene Beispiel der ersten Mercedes-Benz A-Klasse bewies (weitere Details finden sich in [15]).

Die zur Kippsicherheit minimal nötige, durch die Radaufstandspunkte festgelegte sogenannte *Footprint*-Fläche ist bei einem Dreiradfahzeug $A_{FP,3} = 3\sqrt{3}r_{res}^2$ und somit um ca. 30 % größer als die quadratische Umfassung. Schwerwiegender ist die um 50 % größere minimale Breite eines dreirädrigen Fahrzeugs, das anders als in Abb. 13.6 mit zwei Eckpunkten in Längsrichtung orientiert ist (ansonsten in der gezeigten Lage 73 % vergrößerte Breite). Daher wird ein dreirädriges Fahrzeug mit rein statischer Abstützung auch als autonomes Fahrzeug kaum Anwendung finden.

Abb. 13.6 Für Kippsicherheit benötigte Footprint-Fläche



Eine hybride Fahrwerklösung, die einen für die statische Abstützung zu kleinen Footprint aufweist, ermöglicht die Verlagerung des Schwerpunkts, sodass der in Abb. 13.6 gezeichnete Kreis sich in Bezug zum Fahrwerk verlagert, sich z. B. in einer Linkskurve nach links verschiebt. Die Verschiebung ist grundsätzlich sowohl mit einer Translationsbewegung als auch einer Rotationsbewegung darstellbar. Für das Letztgenannte steht beispielhaft das dreirädrige Motorrollerkonzept des Piaggio MP3 [16] mit seinen beiden Vorderrädern und einer Parallelogramm-Kinematik, die eine Schräglage des ganzen Rolleraufbaus möglich macht. Somit besitzt dieses Fahrzeug eine zwar eingeschränkte statische Kippstabilität, benötigt aber keine permanente Regelung für konstante Bedingungen wie z. B. für Geradeausfahrt. In Verbindung mit der o. g. Verkleidung und dem Schutzrahmen käme ein solches Konzept durchaus als Vehicle-on-Demand in Frage, wenn die Transportaufgabe darin besteht, eine, vielleicht sogar zwei Personen zu transportieren.

In analoger Weise kann ein drittes Rad auch ein einachsiges Konzept wie den schon genannten EN-V ergänzen. Damit erfolgt die statische Abstützung durch ein vor oder hinter der Hauptachse angebrachtes Rad. Allerdings erfordert die Beibehaltung des Drehens im Stand eine Lenkbarkeit des Zusatzrades. Auch Vierradkonzepte mit für Kippsicherheit zu kleinem Footprint sind denkbar. Ein Beispiel hierfür ist die Nissan-Studie Land Glider [17], ein 1,10 m breites Fahrzeug, das bis zu 17° Querneigung annehmen kann. Ob diese im Vergleich zum Motorroller doch noch große Breite für ein Vehicle-on-Demand relevante Vorteile gegenüber einem in üblicher Breite ausgelegten einfachen Fahrzeug ohne Neigetechnik mit sich bringt, ist zu bezweifeln. Allein die mit der Neigetechnik verbundene Möglichkeit der Kompensation der Querkraft auf die Insassen könnte ein Pluspunkt sein. Neben Neigesystemen könnten grundsätzlich auch adaptive Fahrwerke mit variabler Spurweite oder variablem Radstand sowie variabler Schwerpunkthöhe zu einer Kippsicherheit nach Bedarf führen [18].

13.4.3.2 Lenkkonzepte

Heute dominiert bei Automobilen die Achsschenkelenkung an der Vorderachse, und es spricht wenig dagegen, diese auch für das Vehicle-on-Demand zu verwenden. Allerdings können alternative Lenkkonzepte durch das autonome Fahren aufgewertet werden. Dazu gehört zum einen das Kraftlenken, also über seitlich unterschiedliche Kräfte bis hin zu unterschiedlicher Kraftrichtung, z. B. für Linkseindrehen negative Antriebskraft links und positive rechts. Dieses Konzept ist beim einachsigen Zweirad das Mittel der Wahl. Für drei oder vier Räder verursacht das Kraftlenken erhebliche Verzwindungen, sofern nicht ein oder mehrere zusätzliche Drehfreiheitsgrade für die Räder ein Mitlenken unterstützen.

Auf der anderen Seite steht die mehrachsige Lenkung, oft als Vierrad- oder Allradlenkung bezeichnet. Obwohl grundsätzlich im Automobilbau bekannt, sind nur sehr wenige damit ausgestattete Fahrzeuge erhältlich. Eine Nutzeneinschränkung liegt in der Kompromissauslegung heutiger Allradlenkungsfahrzeuge, die ein Fahrzeugentwickler durchführen muss. Es gibt für den Fahrer keinen Zugriff auf die Hinterradlenkung. Sie ist (elektronisch) an die Vorderradlenkung gekoppelt. In einer Kompromissabstimmung unterstützt sie bei aktuellen Fahrzeugen im unteren Geschwindigkeitsbereich (≤ 100 km/h) die Fahrzeugagilität mit gegensinnigen Lenkwinkeln und bei höheren (≥ 100 km/h) die Stabilität durch gleichsinnige Lenkwinkel. Darüber hinaus erfolgen Lenkkorrekturen im fahrdynamischen Grenzgebiet. Eine autonome Trajektorienplanung könnte diesen Freiheitsgrad unabhängig von der Geschwindigkeit nutzen und entsprechend der geplanten Manöver einsetzen. So wäre ein Fahrstreifenwechsel auch ohne Gieren, also ohne Drehen um die Hochachse, möglich, wodurch die Rückwirkung auf die Passagiere reduziert werden kann. Beim Einparken lassen sich Manöver durchführen, die mit einer im üblichen Rahmen ausgelegten Allradlenkung nicht möglich sind, geschweige denn mit einer Standard-Vorderachslenkung.

Eine extreme Lösung wäre eine radindividuelle Allradlenkung, die zwar die Winkel aller Räder optimal stellen könnte, aber dafür noch aufwendigere Stellersysteme benötigt. Der Gewinn ist in Bezug auf die Anwendung als Vehicle-on-Demand gering. Er beschränkt sich auf eine eher für den Rennbetrieb relevante Verschiebung der Fahrdynamikgrenzen um wenige Prozent und die Reduktion des Kurvenwiderstands durch verzwindungsfreie Radführung.

13.4.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Schnittstelle

Wird das Vehicle-on-Demand für den Personentransport eingesetzt, ergeben sich die in Tab. 13.1 genannten Möglichkeiten der Art der Unterbringung, deren Ausrichtung und Anordnung. Grundsätzlich spricht hier nichts gegen die heute übliche Art der vor- und nebeneinander angeordneten, nach vorne gerichteten Sitze. Soweit es der Insassenschutz zulässt, kann auch davon abgewichen werden, und insbesondere sollte für die Erholung die Liegeposition offeriert werden, wobei die Ausrichtung offen bleibt, z. B. als Sitzbank in Querrichtung oder als Liegesitz in Längsrichtung.

Tab. 13.1 Allgemein mögliche Unterbringung von Insassen – Art, Ausrichtung, Anordnung

Art	stehen	sitzen	liegen	variabel
Ausrichtung	nach vorne	zur Seite	nach hinten	variabel
Anordnung	voreinander	nebeneinander	übereinander	variabel

Da keine Fahraufgabe von den Insassen zu übernehmen ist, bleibt im Wesentlichen das Interface auf die Zieleingabe, die Insasseninformation und einen Safe-Exit-Schalter, der ein Anhalten an nächster sicherer Position auslöst, beschränkt. Die ersten beiden können sogar vom Fahrzeug losgelöst sein und über ein Personal Device, ähnlich heutigen Smartphones, ermöglicht werden. Weitergehende Interaktionen sind für die Ambientesteuerung (z. B. Schließen der (elektronischen) Jalousien) und mögliche Unterhaltungsprogramme zu erwarten.

13.5 Use-Case-Gesamtbetrachtung

Autonomes Fahren unterscheidet sich weniger im Fahrzeugkonzept als in der Nutzung der Fahrzeit. Bei der heutigen Belegung von Autos mit statistisch 1,5 Personen [19] kann der Großteil der Personen nicht die Möglichkeiten nutzen, die ein Beifahrer heute schon besitzt, wie z. B. Lesen, Arbeiten oder Schlafen (s. Abb. 13.7). Dieses wird beim autonomen Fahren möglich. Darüber hinaus können Aktivitäten durchgeführt werden, die derzeit zu einer

Abb. 13.7 Nutzungsmöglichkeiten für Insassen beim autonomen Fahren



unzulässigen Ablenkung des Fahrers führen würden, z. B. multimediale Unterhaltung auf einem Großbild und Surroundklang bis hin zum sogenannten 4-D-Kino.

Eine weitere Änderung besteht im Nutzerkreis. War bisher immer ein Fahrer mit Fahrerlaubnis erforderlich, so entfällt zumindest beim Vehicle-on-Demand diese Einschränkung, sodass neue Nutzer das autonome Fahrzeug benutzen, die heutzutage allenfalls Mitfahrer im Fahrzeug sind. Dies können Personen sein, die aufgrund körperlicher Defizite (z. B. Sehschwäche) keine Fahrerlaubnis erhalten, oder aber Personen ohne Fahrerlaubnis wegen mentaler Defizite oder einfach aus Altersgründen ausgeschlossene Gruppen wie Kinder und Jugendliche. Entsprechend müssen das Fahrzeug- und das Betriebskonzept auch auf solche Nutzer angepasst werden. Zuvor müssen die Anforderungen definiert werden, welche Autorität die Insassen über das Geschehen im Fahrzeug und auf das Fahren haben werden.

13.6 Fahrzeugübergreifende Änderungen

Standen bisher die Einzelfahrzeuge im Fokus der Betrachtung, wird die Systemgrenze in diesem Abschnitt auf die Interaktion mit der Umwelt und anderen Verkehrsteilnehmern erweitert. Die Interkonnektivität der Fahrzeuge wird schon früher als Technik für alle (Neu-)Fahrzeuge etabliert sein, sodass sich damit nichts grundsätzlich Neues durch die Einführung des autonomen Fahrens ergibt. Allerdings steigt mit der Automatisierung der Fahrzeuge deren Leistungsfähigkeit, die neue Nutzungsweisen ermöglicht. Durch zu erwartende höhere Präzision autonomer Fahrzeuge sind elektronisch gesteuerte Manöver denkbar, die in dieser Form im heutigen Verkehr kaum denkbar sind. Zu diesen Möglichkeiten zählt das Konvoi-Fahren in sehr geringem Abstand oder das Fahren in besonders engen Fahrstreifen. Die Auswirkung auf den Verkehrsfluss wird anhand von Abb. 13.8 deutlich. Die Anzahl von Verkehrselementen, die die abgebildete Verkehrsfläche durchqueren, nimmt pro Zeiteinheit zu. Wird das mit entsprechenden Bevorrechtigungen gekoppelt, kann dies dem autonomen Fahren einen Schub geben. Abhängig von den mit solchen Bevorrechtigungen verbundenen Vorgaben kann sich auch das Fahrzeugkonzept ändern und mit diesen Vorgaben sogar das Aussehen. Wie weit eine solche Reglementierung in das Fahrzeugkonzept eingreifen kann, belegt die in der EU übliche Begrenzung der Gesamtfahrzeuglänge von Lkw. Dadurch sind alle Zugfahrzeuge in Europa mit einer steilen, platzsparenden Fahrzeugfront ausgestattet, während in Nordamerika ohne diese Art der Begrenzung die Motorhaube aerodynamisch günstiger nach vorn gestreckt ist.

Denkbar, wenn auch aus heutiger Sicht noch sehr ausgefallen, ist der Stoffaustausch während der Fahrt, wie es heute in der Landwirtschaft (z. B. Entladen des Getreideguts beim Mähen) oder in der Luftfahrt beim Betanken in der Luft bekannt ist. Für Gütertransport oder Personentransport könnte so Zeit und Raum gespart werden. Entsprechend müssen folglich Übergangszonen im Fahrzeugkonzept vorgesehen sein. In Abb. 13.8 wird dieses Prinzip dargestellt. Ein Lkw-ähnliches Langstrecken-Fahrzeug übergibt Güter während der Fahrt an das kleinere „Verteilerfahrzeug“. Die Fahrt wird mittels Automation präzise synchronisiert, und eine Art Brücke ermöglicht den Güteraustausch. Damit lassen

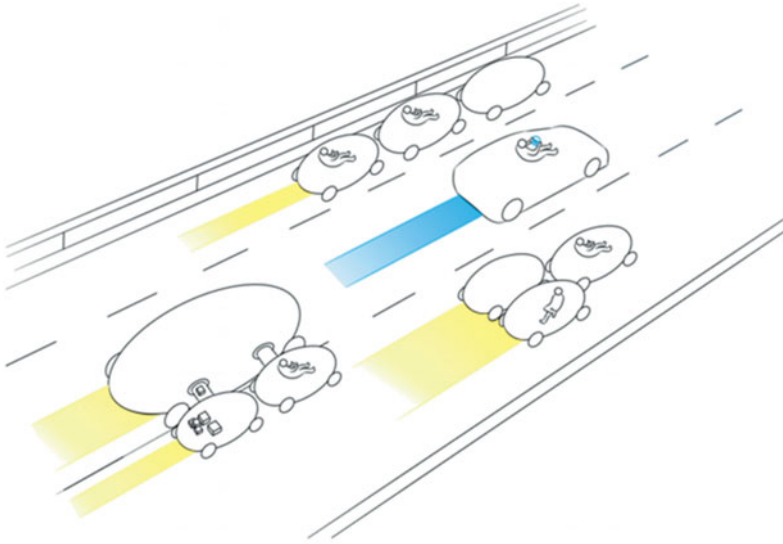


Abb. 13.8 Reduzierte Abstände zwischen den Fahrzeugen – ermöglicht durch die autonome Fahrt mit hoher Präzision

sich völlig neue Logistik- und Mobilitätskonzepte entwickeln, wobei aber ohne Diskussion des Gesamtsystems die Konzeption der Fahrzeuge wenig sinnvoll erscheint, weshalb hier keine entsprechende Vertiefung vorgenommen wird.

13.7 Folgekonzepte

Während die durchgängig behandelten Use-Cases das Potenzial besitzen, der für autonomes Fahren notwendigen Technologie zum Durchbruch zu verhelfen, kann eine Vielzahl von Anwendungen die selbst nicht ausreichend wären, eine Technologie zur notwendigen Reife zu führen, davon profitieren. Somit kämen straßentaugliche Serviceroboter infrage, die z. B. die Straßen, Rad- und Gehwege reinigen und sich selbstständig über öffentliche Wege von Einsatzort zu Einsatzort bewegen. Andere bisher auf Betriebshöfe eingeschränkte Transport- und Arbeitsmaschinen könnten diese verlassen, oder anders gesagt: Der Betriebshof erweitert sich auf öffentliches Gelände.

Damit verschwinden die Grenzen, die bisher noch um autonome Systeme gezogen werden, sowohl von der Skalierung her (vom Haushaltsroboter über Gehhilfe und Reinigungsroboter zum Postaustragemobil und Krankentransport) als auch bezüglich der privaten, öffentlichen und betrieblichen Bereiche ihres Einsatzes. Diese Konzepte hätten auf die Arbeitswelt einen großen Einfluss und könnten durch eine neue Rationalisierungswelle die Zahl der im Mobilitätssektor tätigen Menschen senken. Dieser Use-Case, dem Vehicle-on-Demand-Konzept folgend, besitzt das Potenzial, vor allem die Zahl der Berufsfahrer-

arbeitsplätze erheblich zu senken. Neben der Arbeitswelt könnten solche Fahrzeuge besonders den Zugang zu Waren revolutionieren, da der Weg vom Wunsch nach Waren bis zur physikalischen Auslieferung automatisierbar wird (s. Kap. 18). Modellversuche mit Multi-Copter-„Drohnen“ zeichnen diesen Weg für leichte Güter schon vor. Durch den nicht einholbaren Energieeffizienzvorteil von Radfahrzeugen wird die Nachfrage nach autonomen Radfahrzeugen für die Auslieferung schwererer Güter sicherlich kommen.

13.8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lassen sich nach der Betrachtung der vier Use-Cases folgende drei Schwerpunkte für Konzeptänderungen identifizieren:

Die Fahrzeit beim autonomen Fahren bindet niemanden mehr an die Fahraufgabe. Dadurch entstehen Freiräume für die Nutzung dieser Zeit. Die unterschiedlichen Nutzungsziele werden einen starken Einfluss auf den Innenraum und die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ausüben.

Die Entkopplung von der Fahraufgabe ermöglicht eine Veränderung der Ankopplung an die Umgebung. Dies gilt sowohl für den haptischen Kanal zur Entkopplung von fahrbahn- und fahrdynamikinduzierten Krafteinwirkungen auf die Insassen als auch für die visuelle Entkopplung. Allerdings besteht hier der Vorbehalt wegen möglicher visuell-vestibularer Konflikte, wie sie heute in Fahrsimulatoren zu beobachten sind. Diese werden erst dann gelöst, wenn eine vollständige Entkopplung in beiden Welten erreicht wird, d. h. gar kein visueller Eindruck von außen und keine Kraft auf die Insassen einwirken. Dies wäre nicht nur sehr aufwendig für das Fahrwerk zu realisieren, sondern möglicherweise für die Insassen beängstigend.

Da autonomes Fahren immer über eine By-Wire-Stelleransteuerung erfolgt, kann von einer sehr hohen Präzision der Bewegungssteuerung ausgegangen werden. Zum einen ermöglicht dies neue Lenkkonzepte, möglicherweise auch gekoppelt mit Vorrichtungen zur Kippsicherung bei Fahrzeugen mit einem zur alleinigen Kippsicherheit unzureichenden Footprint, insbesondere wenn eine Steuerung durch den Menschen nicht mehr vorgesehen ist. Andererseits ermöglicht diese Präzision die Kopplung an andere autonome, ebenso präzise Fahrzeuge, um die Infrastruktur besser auszunutzen oder heute noch ausgefallen anmutende Konzepte wie Car2Car-Stoffaustausch zu ermöglichen.

Mit Blick auf die Zukunft stellt sich die Frage, ob das autonome Fahren die Fahrzeugkonzepte revolutionieren wird.

Die Automation treibt eine Revolution der Fahrzeugkonzepte nicht an. Zwar werden manche Konzepte durch die Automatisierung weniger „benachteiligt“, die klassischen Fahrzeugkonzepte wie vierrädrige Pkw werden jedoch voraussichtlich auch in der automatisierten Straßenverkehrswelt dominieren. Für spezielle Nischeneinsatzbereiche ergeben sich aber neue Möglichkeiten, nur wird die Attraktivität dieser Nischen eher durch spezifische Regulierungen und Zugangsbeschränkungen getrieben als durch die Überlegenheit des Konzepts für den allgemeinen motorisierten Individualverkehr.

Wie schon heute wird auch bei autonomen Fahrzeugen die Nutzung des Konzept bestimmen, wobei die Nutzung der gewonnenen Fahrzeit gerade Innenraumkonzepte neu beleben wird.

Möglicherweise wird die Technologie des autonomen Fahrens den Markt noch weiter als heute differenzieren:

Auf der einen Seite werden teure komfortorientierte Hightech-Fahrzeuge, die Sänften gleichen, als rollendes Wohn-, Arbeits- oder Schlafzimmer dienen.

Auf der anderen Seite werden kostengünstige Zweckfahrzeuge eingesetzt werden, die die für den Transportdienst notwendige Ausrüstung mitbringen, aber darüber hinaus eher kleinen Stadtbussen gleichen und weder emotionale Anziehungskraft besitzen noch hohe Komfortansprüche befriedigen.

Die für autonome Fahrzeuge in den o. g. Use-Cases entwickelte Technologie wird noch viele Spin-off-Anwendungen nach sich ziehen, die die Dienstleistungswelt erheblich ändern können.

Literatur

1. Gasser, T. M.; Arzt, C.; Ayoubi, M.; Bartels, A.; Bürkle, L.; Eier, J.; Flemisch, F.; Häcker, D.; Hesse, T.; Huber, W.; Lotz, C.; Maurer, M.; Ruth-Schumacher, S.; Schwarz, J.; Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der BAST-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ Dokumentteil 1. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, Heft F 83, (2012)
2. Franz, B.: Entwicklung und Evaluation eines Interaktionskonzepts zur manöverbasierten Führung von Fahrzeugen. Dissertation, Institut für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, (2014)
3. Winner, H., Heuss, O.: X-by-Wire-Betätigungselemente – Überblick und Ausblick. In: Winner, H., Landau, K. (Hrsg.): Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug – Cockpits für Straßenfahrzeuge der Zukunft, Technische Universität Darmstadt, Ergonomia-Verlag, Stuttgart, (2005)
4. Futschik, H. D., Achleitner, A., Döllner, G., Burgers, C., Friedrich, J. K.-H., Mohrdieck, C. H., Schulze, H., Wöhr, M., Antony, P., Urstöger, M., Noreikat, K. E., Wagner, M., Berger, E., Gruber, M., Kiesgen, G.: Formen und neue Konzepte. In Braess, H.-H., Seiffert U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, (2013), S. 119–219
5. Kammel, S.: Autonomes Fahren. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (eds.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, pp. 651–657. Vieweg+Teubner Verlag, (2012)
6. Durth, W.: Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer. Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung In: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn-Bad Godesberg, H **163**, (1974)
7. McConnell, W.A.: Human Sensitivity to Motion as a Design Criterion for Highway Curves. Highway Research Board Bulletin(149), (1957)
8. Fischer, M.: Motion-Cueing-Algorithmen für eine Realitätsnahe Bewegungssimulation. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz-Gemeinschaft, DLR, (2009)
9. Betz, A.: Feasibility Analysis and Design of Wheeled Mobile Driving Simulators for Urban Traffic Simulation, Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, (2014)
10. Schütz, T.: Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort, 6. Auflage, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013

11. YSegway® Personal Transporter: <http://www.segway.de/segway-pt/das-original>, Abruf am: 26.08.2014
12. SegwayY® Advanced Developement, Project P.U.M.A: <http://www.segway.com/puma>, Abruf am: 26.08.2014
13. GM EN-V Concept: A Vision for Future Urban Mobility: <http://media.gm.com/autoshow/Shanghai/2010/public/cn/en/env/news.detail.html/content/Pages/news/cn/en/2010/March/env01.html>, Abruf am: 26.08.2014
14. BMW C1: http://de.wikipedia.org/wiki/BMW_C1, Abruf am: 26.08.2014
15. Baumann, F.: Untersuchungen zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen, Fortschritt-Bericht VDI Reihe 12 Nr. 552, VDI-Verlag, Düsseldorf, (2003)
16. Piaggio MP3: <http://www.de.piaggio.com/piaggio/DE/de/news/MP3.html#main>, Abruf am: 26.08.2014
17. Schröder, C.: Tokyo Motor Show: Nissan präsentiert Stadtauto mit Neigetechnik, Verfügbar unter: <http://www.springerprofessional.de/tokyo-motor-show-nissan-praesentiert-stadtauto-mit-neigetechnik-10712/3946650.html>, Abruf am: 26.08.2014
18. Schweitzerhof, H., Betz, A., Winner, H.: Analysis of a situational adaptive chassis with respect to maneuverability and footprint. In: Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. IDETC/CIE 2014, Buffalo, New York, USA, August 17–20 (2014)
19. Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): Mobilität in Deutschland 2008, Ergebnisbericht: Struktur, Aufkommen, Emissionen, Trends, Bonn und Berlin, (2010)

Implementierung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems

Sven A. Beiker

Inhaltsverzeichnis

14.1 Einleitung 288

14.2 Begriffsbestimmung und Abgrenzung 288

14.3 Das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem 289

 14.3.1 Technische Ausführung 290

 14.3.2 Operativer Betrieb 292

 14.3.3 Geschäftsmodell 294

14.4 Erfahrungen bei der Umsetzung des Transportsystems 295

 14.4.1 Evaluations-, Versuchs- und Öffentlichkeitsbetrieb 295

 14.4.2 Auswahl des Fahrzeugkonzepts 297

 14.4.3 Risikobewertung und Rechtseinordnung 297

 14.4.4 Vertragsgestaltung 298

 14.4.5 Auswahl des Betriebsgebiets und der Betriebsszenarien 299

 14.4.6 Einrichtung des Transportsystems und Zertifizierung des Personals 301

 14.4.7 Systemstart und Betriebsüberwachung 302

 14.4.8 Information für Nutzer und Passanten 303

 14.4.9 Öffentliche Reaktionen 304

14.5 Zusammenfassung und Ausblick 305

Literatur 307

S. A. Beiker (✉)
formerly Stanford University, Center for Automotive Research at Stanford, USA
sven@svenbeiker.com

14.1 Einleitung

Derzeit wird in der Fachwelt und in der Öffentlichkeit viel über automatisierte (oft auch „autonom“ genannte) Fahrzeuge diskutiert und geforscht bzw. werden deren erste Produktumsetzungen entwickelt. Dabei steht häufig der individuell genutzte Pkw im Mittelpunkt der Betrachtung, d. h., der Blick richtet sich auf die zunehmende Automatisierung der Fahrzeuge auf Stadt- und Fernstraßen. Während die Vision, dass Pkw auf öffentlichen Straßen ohne menschlichen Eingriff selbsttätig fahren, noch in ferner Zukunft zu liegen scheint, gibt es bereits Beispiele, wo schon heute oder zumindest sehr bald selbstfahrende Fahrzeuge für den öffentlichen Personentransport eingesetzt werden. Nachdem schienengebundene Systeme über die letzten Jahrzehnte bereits erfolgreich ohne fahrzeugseitiges Personal betrieben wurden, wird nun auf der Straße die Schiene als „Leitmedium“ durch Satellitennavigation sowie Hinderniserkennung ersetzt, um dann eine automatisierte Fahrt zum Wunschziel des Nutzers zu ermöglichen.

Von solchen selbstfahrenden Transportsystemen kann bereits heute viel an Erfahrung für die zukünftige Einführung hochgradig automatisierter Pkw abgeleitet werden, obwohl diese Systeme häufig nur in einem begrenzten Gebiet wie dem Innenstadtbereich betrieben werden. So sind beispielsweise die betriebsbedingten, nutzerspezifischen, versicherungstechnischen oder haftungsrechtlichen Belange für langsam fahrende und gebietsbegrenzte Fahrzeuge im Kern oftmals ähnlich denen für Fahrzeuge auf Autobahnen. Damit steht zu hoffen, dass die hier beschriebenen selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsysteme trotz unterschiedlicher Zielrichtungen im Vergleich zu hochgradig automatisierten Reiselimousinen Synergien aufzeigen, die für die Einführung letzterer in den öffentlichen Straßenverkehr wegweisend sein können. In diesem Beitrag wird von der Implementierung eines solchen Transportsystems an der Stanford Universität in Kalifornien berichtet. Anliegen dieses Berichts ist es, die hier gemachten Erfahrungen der zukünftigen Einführung anderer automatisierter Fahrzeuge zugutekommen zu lassen.

14.2 Begriffsbestimmung und Abgrenzung

In diesem Beitrag wird hauptsächlich von „selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystemen“ bzw. derartigen Fahrzeugen gesprochen. Der Begriff „selbstfahrend“ ist dabei in den Bereich der Fahrzeugautomatisierung einzuordnen: In Straßenfahrzeugen werden Computersysteme so eingesetzt, dass dem Menschen die Fahraufgabe abgenommen wird. In dem hier betrachteten Fall wird die Fahraufgabe entsprechend der „Navigation“, „Bahnführung“ und „Stabilisierung“ vollständig durch Computersysteme ausgeführt, und ein Fahrer ist damit nicht mehr erforderlich. Unter Umständen ist sogar keine einzige Person im Fahrzeug anwesend, wenn das Fahrzeug beispielsweise für logistische Zwecke eine Leerfahrt unternimmt. Diese Automatisierungsebene wird auch als „Vollautomatisierung“ entsprechend der Definition SAE J3016 [1] bezeichnet.

Der Begriff „individuell abrufbar“ (englischsprachig *on-demand*) beschreibt, dass das Transportsystem vom Nutzer für die individuelle Verwendung abgerufen werden kann (s. Kap. 2). Das kann beispielsweise über eine Smartphone-App erfolgen, d. h., der Nutzer kann ein Fahrzeug zum derzeitigen Standort anfordern, genauso wie ein Taxi, nur mit dem Unterschied, dass die Fahrzeuge des hier betrachteten Transportsystems keine Fahrer benötigen. Damit ergibt sich auch, dass der Begriff „Transportsystem“ als ein Gesamtkonzept aus verschiedenen Fahrzeugen sowie einer zentralen Infrastruktur, die die Fahrzeuge übergeordnet für den Nutzereinsatz koordiniert, verstanden wird.

Die Betrachtungen, die im vorliegenden Beitrag für ein solches Personentransportsystem angestellt werden, beziehen sich auf ein Ballungsgebiet, also einen bebauten Raum mit einer erhöhten Bevölkerungsdichte. Das bedeutet, dass eine urbane Bebauung mit Straßen, Parkplätzen, Radwegen, Fußwegen, Fußgängerzonen sowie Gebäuden angenommen wird, auf und zwischen denen das Transportsystem für die Personenbeförderung eingesetzt wird. Die Größe des Ballungsgebiets ist dabei weniger entscheidend als deren städtebaulicher Charakter, d. h., es ist unerheblich, ob es sich um eine sogenannte „Mega-City“ handelt oder lediglich um den Innenstadtbereich einer Mittel- oder gar Kleinstadt. Die hier betrachteten Personentransportsysteme werden für den generellen Einsatz dort betrachtet, wo der öffentliche Personentransport oder das privatgenutzte Automobil keine optimale Lösung für die Mobilitätsbedürfnisse von Nutzern darstellt.

14.3 Das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem

In diesem Beitrag wird ein konkretes Beispiel eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems beschrieben, und zwar das Fahrzeug „Navia“ der französischen Firma Induct [2]. Ein solches Fahrzeug stand von Juli 2013 bis Februar 2014 an der Stanford Universität für Evaluationszwecke zur Verfügung, sodass der Einsatz dieses Fahrzeugs seit Anfang 2013 operativ gestaltet und dokumentiert werden konnte. Auf diesen empirischen Erfahrungen beruhen die nachfolgenden Ausführungen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass Fahrzeuge wie der Navia ein gutes Beispiel für einen allgemeinen Trend solcher Systeme sind [3, 4, 5, 6]. In diesem Zusammenhang sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die spezielle Darstellung des Navia in keinsten Weise eine Präferenz oder Bewertung des Systems im Vergleich zu anderen darstellt, auch hat die Firma Induct keinerlei Einfluss auf die Beschreibung der hier diskutierten Sachverhalte ausgeübt. Das bedeutet, dass die folgenden Beschreibungen zwar auf Grundlage der Erfahrungen mit dem Induct Navia an der Stanford Universität entstanden sind, im wissenschaftlichen und verkehrsplanerischen Sinne aber eine generelle Anwendbarkeit für selbstfahrende und individuell abrufbare Transportsysteme im Allgemeinen haben und bei der Umsetzung anderer Systeme grundsätzlich genutzt werden können.

14.3.1 Technische Ausführung

Das für die Ausführungen in diesem Beitrag betrachtete selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem nutzt Fahrzeuge, die mit Satellitennavigation, Laser, Kameras, Ultraschall, Lenkwinkel- und Raddrehwinkelsensoren ausgestattet sind. Mit diesen Sensoren und Systemen können Position und Umfeld des Fahrzeugs bestimmt und überwacht werden. Während die Satellitennavigation bereits eine recht genaue Positionsbestimmung ermöglicht (im Falle der Verwendung von zusätzlichen Korrekturmethoden bis in den Zentimeterbereich hinein), nutzen die hier betrachteten Systeme ein Verfahren, das als Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) bezeichnet wird.

Für dieses Verfahren wird das Fahrzeug zunächst durch Betriebspersonal in dem geplanten Betriebsgebiet manuell gesteuert, während die Koordinaten der Satellitennavigation und die Daten der Laser-, Kamera-, und gegebenenfalls Ultraschallsysteme aufgezeichnet werden. Aus diesen Daten wird eine digitale Karte des Betriebsgebiets erstellt, die allerdings – anders als herkömmliche Karten – eine dreidimensionale Repräsentation des Gebiets ergibt. Diese Repräsentation beschreibt die stationäre Situation des Gebiets, d. h., alle Veränderungen, die im späteren Betrieb der Fahrzeuge gegenüber diesen gespeicherten Daten wahrgenommen werden, werden als bewegliche oder zumindest neu hinzugekommene Hindernisse eingeordnet. Diese Veränderungen sind damit besonders zu beachten und erfordern möglicherweise eine Abweichung von der vorprogrammierten Bahn.

Die SLAM-Technologie stellt damit eine „virtuelle Schiene“ dar, d. h., was für automatisierte Schienensysteme die physikalische Spurführung, ist für die hier betrachteten Systeme die Satellitennavigation als Referenzsystem in Verbindung mit der Umfelderkennung. Abweichungen zwischen der gespeicherten Repräsentation und der kontinuierlichen Umfelderkennung werden als Hindernisse eingeordnet, die gegebenenfalls eine Änderung der Routen- bzw. Bahnführung erfordern. Dabei dienen die Lasersensoren vorrangig zum Erfassen von Objekten (beispielsweise Personen, Fahrzeuge, Bebauung, Hindernisse) im Mittel- und Fernbereich mit einer Entfernung vom Fahrzeug von mehr als ca. einem Meter bis hin zu 200 Metern. Die Ultraschallsensoren werden für Objekterkennung im Nahbereich eingesetzt, also weniger als zwei Meter vom Fahrzeug entfernt. Die Kamerasysteme bieten darüber hinaus zusätzliche Informationen über die Kontur und damit Art des erfassten Objekts (z. B. Person oder Pflanze), sodass ein möglichst vollständiges Bild nach Art, Entfernung, Richtung und gegebenenfalls Geschwindigkeit der umgebenden Objekte entsteht.

Änderungen des Referenzsystems, also Hindernisse in der geplanten Route, werden in der zentralen Steuereinheit des Fahrzeugs berücksichtigt, sodass die tatsächliche Route fortlaufend unter Beachtung verschiedener Bewertungskriterien bestimmt werden kann. Somit werden je nach eingegebenem Fahrziel und augenblicklicher Verkehrs- und Umfeldsituation eine optimale Route und Bahn berechnet und ausgeführt. Selbst wenn augenblicklich keine Route befahren werden kann, beispielsweise weil die fahrzeugseitige Sensorik bei Annäherung an ein Hindernis erkennt, dass dieses nicht umfahren werden kann und auch keine Alternativroute verfügbar ist, würde das Fahrzeug dann die Fahrt bis zur Beseitigung des Hindernisses unterbrechen.

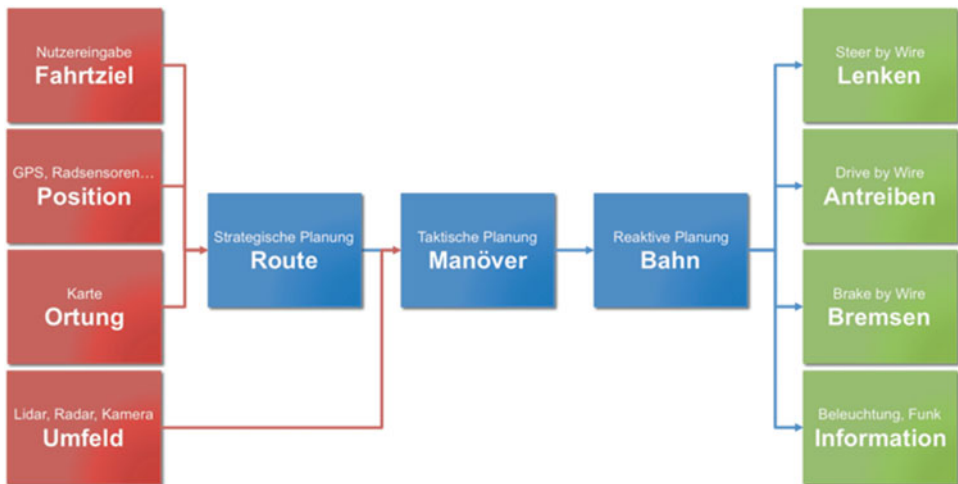


Abb. 14.1 Blockschaltbild eines selbstfahrenden Fahrzeugs (schematisch, vereinfacht)

Die Fahrbefehle werden an die elektrifizierten Lenkungs-, Brems- und Antriebssysteme zur Umsetzung übermittelt. Das bedeutet, das Fahrzeug verfügt über elektronische Schnittstellen für diese Komponenten, sodass die zentrale Steuereinheit des Fahrzeugs Lenk-, Brems- und Antriebsbefehle übermitteln kann und das Fahrzeug somit die Fahrt durch das Zusammenspiel von Umfelderkennung, Informationsverarbeitung und Fahrtwunsch selbstständig ausführt (s. Abb. 14.1). Dabei wird jede Achse einzeln über je einen bürstenlosen 48V/8kW-Elektromotor angetrieben. Das Fahrzeug verfügt über unabhängige Lenkungen an Vorder- und Hinterachse. Die technische Höchstgeschwindigkeit beträgt 40 km/h, ist für erste Anwendungen auf 20 km/h limitiert und kann bei Bedarf weiter per Parametrierung begrenzt werden, der Wendekreisdurchmesser beträgt 3,5 Meter.

Der Benutzer des Fahrzeugs hat mehrere Eingriffsmöglichkeiten in den Fahrzeugbetrieb. Zum einen kann das Fahrzeug über einen Eingabebildschirm an einer festen Haltestelle abgerufen werden, im allgemeinen Fall wird das aber über eine Smartphone-App erfolgen. Wenn das Fahrzeug dann selbsttätig zu der angeforderten Einsteigeposition kommt, werden nach Fahrzeugstillstand die Parkbremsen angezogen und die Tür (in diesem Falle eine offene Stahlrohrkonstruktion) geöffnet, sodass Passagiere sicher in das Fahrzeug einsteigen können. Dann gibt der Benutzer über einen im Fahrzeug verbauten Eingabebildschirm das gewünschte Fahrziel ein, worauf sich die Tür wieder schließt und die Parkbremse gelöst wird, sodass sich das Fahrzeug entsprechend der nun geplanten Route in Bewegung setzen kann. Dabei haben Passagiere die Möglichkeit, das Fahrzeug jederzeit durch einen Notfallschalter sofort zu stoppen. In solch einem Fall können Passagiere auch über eine Kommunikationsanlage mit dem Betriebspersonal in Verbindung treten, um Hilfe anzufordern oder sonstige Belange zu klären. Da die Verbindung über Funkkommunikation erfolgt, kann das Betriebspersonal vollkommen unabhängig vom eigentlichen Betriebsgebiet der Fahrzeuge stationiert sein.



Abb. 14.2 Offene Bauweise des Induct Navia [2] (Abbildung mit freundlicher Genehmigung der Fa. Induct)

Wie Abb. 14.2 zeigt, zeichnet sich das hier betrachtete Fahrzeug durch eine sehr offene Bauweise aus. Oberhalb Hüfthöhe der Passagiere gibt es keine geschlossene Beplankung, sondern nur vier Stützen für das Baldachindach. Sitze sind in dem Fahrzeug ebenfalls nicht vorhanden, sondern nur Möglichkeiten für Passagiere, sich an gepolsterten Stützen anzulehnen. Das Fahrzeug bietet Platz für bis zu acht Personen (maximale Zuladung 800 Kilogramm); die Hauptabmessungen betragen $3,5 \times 2,0 \times 2,5$ Meter (Länge \times Breite \times Höhe).

Die Stromversorgung der Fahrzeuge hat eine geschätzte Betriebsdauer von ca. acht Stunden über den chemischen Energiespeicher (Batterie) oder 20 Minuten über den kapazitiven Energiespeicher (*Supercapacitor*). Das Laden kann wahlweise außerhalb der Betriebszeiten über ein Kabel erfolgen oder während kurzer Betriebspausen über eine drahtlose Ladestation. Gerade die drahtlose Ladevariante ist für das fahrerlose Betriebsmodell von Vorteil, da die Fahrzeuge bei Bedarf selbstständig zur Ladestation fahren können und kein Personal erforderlich ist, um beispielsweise ein Ladekabel anzuschließen. Für den Betrieb an der Stanford Universität wird allerdings vorerst die Ladevariante per Kabel außerhalb der Betriebszeiten vorgezogen, da sich das für den zunächst geplanten Versuchsbetrieb mit dem Betriebspersonal vor Ort vergleichsweise einfach darstellen lässt.

14.3.2 Operativer Betrieb

Für den Betrieb eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems sind trotz des weitestgehend unabhängig operierenden Charakters einige spezielle Bedingungen zu betrachten. So ist beispielsweise Betriebspersonal erforderlich, das, wenn auch nicht notwendigerweise jeden einzelnen Lenk-, Brems- oder Antriebsbefehl, so aber

doch den grundsätzlichen Betrieb im Rahmen des festgelegten Gebiets (räumliche Begrenzungen) bzw. bestimmter Parameter (z. B. Geschwindigkeit oder Position) sicherstellt. Dafür werden – wie beispielsweise auch bei fahrerlosen Bahnen oder Logistiksystemen – Betriebszentren eingerichtet, in denen vergleichsweise wenig Betriebspersonal eine große Anzahl von Fahrzeugen überwacht. Das Betriebszentrum ist mit den einzelnen Fahrzeugen über Funk verbunden und kann die Betriebsdaten des Fahrzeuges überwachen, das Fahrzeug im Notfall stoppen oder auch mit den Passagieren kommunizieren.

In jedem Fall ist aber für den Betrieb der hier betrachteten Fahrzeuge ein Kommunikationssystem einzurichten, das die Betriebsüberwachung ermöglicht. Das kann durch verschiedene Kommunikationsstandards erfolgen, so z. B. über das Mobiltelefonnetz oder aber auch durch WLAN- Netzwerke. In beiden Fällen muss sichergestellt sein, dass die Übertragungszeit und Verfügbarkeit der Datenübertragung den Anforderungen jederzeit gerecht wird.

Damit ist anzumerken, dass aufgrund der kontinuierlichen Funküberwachung und Übernahmemöglichkeit durch das Betriebspersonal keine Vollautomatisierung im strengen Sinne der Definition nach SAE J3016 [1] gegeben ist, da diese für die Vollautomatisierung keinerlei menschliche Überwachung und Übernahme im Ausnahmefall erfordert. Dennoch muss bei Transportsystemen wie dem Navia beachtet werden, dass kein Betriebspersonal unmittelbar vor Ort ist, sodass die Fahrzeuge in der Lage sein müssen, auch einen Notfall selbsttätig zu bewältigen. Das wiederum entspricht einer Vollautomatisierung nach SAE J3016, zeigt aber auch die Grenzen dieser Definition auf.

Des Weiteren sind Streckennetz sowie Betriebszeiten für den Betrieb festzulegen. Das bedeutet, es ist zu definieren, welche Strecken (detaillierte Begrenzung) in welchem Gebiet (übergeordnete Begrenzung) befahren werden können. Die Begrenzung auf ein bestimmtes Gebiet erfolgt aufgrund der Festlegung, welcher Bereich aus Überlegungen hinsichtlich der Nutzerbedürfnisse, Überwachungsanforderungen, Fahrleistungen, Gesetzgebung, Wirtschaftlichkeit oder aus sonstigen Beweggründen heraus mit dem Transportsystem bedient werden soll. Für die hier betrachteten selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsysteme kann die Beschränkung auf eine Fußgängerzone, einen Stadtteil oder auch eine ganze Stadt erfolgen, wobei in allen Fällen im Detail zu beachten ist, auf welchen Wegen, Straßen oder Fahrspuren die Fahrzeuge bewegt werden dürfen.

Für den Betrieb der hier betrachteten Transportsysteme ist für den flexiblen Verwendungszweck zu berücksichtigen, dass auf manchen Wegen, wie beispielsweise in Fußgängerzonen, generell keine motorisierten Fahrzeuge bewegt werden dürfen und in diesem Fall eine entsprechende Genehmigung für den Betrieb dieser speziellen, selbstfahrenden motorisierten Fahrzeuge eingeholt werden müsste. In anderen Fällen, wenn die Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr bewegt werden sollen, muss vermutlich in den meisten Gesetzgebungsbereichen eine Erlaubnis für den Betrieb selbstfahrender Fahrzeuge eingeholt werden. In manchen Gesetzgebungsbereichen, wie z. B. in einigen Bundestaaten der USA, ist eine entsprechende Gesetzgebung bereits in der Umsetzung.

Bezüglich der Betriebszeiten ist zu überlegen, ob die Mobilitätsdienstleistung rund um die Uhr angeboten werden soll, was aufgrund des weitestgehend personalunabhängigen

Betriebs möglich und im Sinne eines kundenfreundlichen Angebots vorteilhaft ist. Allerdings mögen auch hier wieder verschiedene Einschränkungen, vorrangig vermutlich betriebswirtschaftliche Überlegungen, einen Betrieb nur zu bestimmten Zeiten sinnvoll erscheinen lassen. So kann es beispielsweise sein, dass die Fahrzeuge nachts in einem Betriebshof geparkt sein sollten, um Vandalismus vorzubeugen. Eine andere Möglichkeit wäre, dass die Mobilitätsdienstleistung nur dann angeboten werden soll, wenn Busse oder andere öffentliche Verkehrsmittel nicht verkehren, sodass die Fahrzeuge dann tagsüber in einem Betriebshof geparkt wären.

Für alle diese Fälle sind sowohl die räumliche als auch die zeitliche Begrenzung des Fahrzeugbetriebs vergleichsweise einfach durch Einschränkungen mit entsprechenden Betriebsparametern möglich. Das bedeutet, dass mittels der digitalen Karten und auch der freigegebenen Betriebszeiten eine Eingrenzung des Betriebs entsprechend den Vorgaben des Betreibers erfolgen kann.

Um zu gewährleisten, dass das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem entsprechend den Herstellervorgaben betrieben wird, sind vor der ersten Inbetriebnahme Systemeinrichtung, Personalschulung und -zertifizierung durchzuführen. Das bedeutet, dass das Transportsystem entsprechend den einzuhaltenden Betriebsparametern eingestellt werden muss, was i. A. einen manuellen Betrieb erfordert, bei dem – wie zuvor beschrieben – eine digitale Karte des Betriebsgebiets erstellt wird, sodass die Fahrzeuge während des späteren operativen Betriebs eine akkurate Positionierung vornehmen können.

Zusätzlich ist das Betriebspersonal entsprechend den generellen Fahrzeugeigenschaften sowie bezüglich des speziellen Betriebs zu schulen, d. h., Systemeigenschaften, Betriebsbedingungen, Einschränkungen und andere Charakteristiken müssen vom Betriebspersonal erlernt und verstanden werden. Darüber hinaus ist vor jedem Fahrzeugbetrieb, beispielsweise zu Beginn eines jeden neuen Betriebstages, die Betriebssicherheit ähnlich wie bei Flugzeugen festzustellen, aber auch Sonderfälle im Betrieb wie beispielsweise abweichende Streckenführungen müssen erkundet und im Betriebsprotokoll des Transportsystems festgehalten werden.

Aus diesen Gegebenheiten ist zu erkennen, dass, obwohl die Fahrzeuge selbstfahrend sind, eine beträchtliche Vorbereitung für den Betrieb erforderlich ist, die nicht automatisiert erfolgen kann, sondern durch das Betriebspersonal erfolgen muss. Dennoch ist anzunehmen, dass für den Gesamtbetrieb des Transportsystems deutlich weniger Personal erforderlich ist, als wenn für jedes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt ein individueller Fahrer eingesetzt werden müsste.

14.3.3 Geschäftsmodell

Einer der Hauptgründe für den Einsatz von selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystemen ist der deutlich geringere Personalaufwand im Vergleich zum Betrieb mit konventionellen Fahrzeugen. Dies hat auch Einfluss auf das Geschäftsmodell. Der Anbieter des Navia-Systems gibt an, dass die Betriebskosten für den Personentransport

damit um ca. 50 Prozent gesenkt werden können [7]. Das Geschäftsmodell für derartige Systeme besteht also darin, die Mobilitätsleistung durch die Einsparung von Personal deutlich günstiger anzubieten als beispielsweise mit einem Taxidienst. Gegenüber dem individuell genutzten Pkw ergibt sich der Vorteil, dass der Nutzer nicht auch die Fahraufgabe übernehmen muss, sondern anderen Beschäftigungen wie Arbeit, Freizeit oder Ausruhen nachgehen kann.

Darüber hinaus können keine weiteren betriebswirtschaftlichen Vorteile ausgewiesen werden, da ein individuell abrufbarer Betrieb auch mit konventionellen, von Menschen gesteuerten Fahrzeugen möglich wäre. Der Vorteil der selbstfahrenden Fahrzeuge ist allerdings, dass sie auch zu betriebswirtschaftlich unattraktiven Zeiten betrieben werden können, so z. B. nachts, wenn vielleicht nur einmal pro Stunde eine Fahrt von zehn Minuten Dauer angefordert wird. Ein Fahrer müsste dabei 50 Minuten warten, ohne weitere Einnahmen zu haben. Wenn dagegen das selbstfahrende Fahrzeug für 50 Minuten steht, wäre die Wartezeit unerheblich, solange die Gesamtnutzung für den betriebswirtschaftlichen Betrachtungszeitraum profitabel ist.

Bisher sind die Transportsysteme allerdings nur im Pilotbetrieb eingesetzt worden, so beispielsweise zu eingeschränkten Zeiten in Universitäts- oder Einkaufszentren [3, 4, 5]. Da diese Einsätze vorrangig der Vorführung des Systemkonzepts galten, kann das Geschäftsmodell noch nicht vollständig bewertet werden. Mit einem projektierten Einsatz der Fahrzeuge im kommerziellen Betrieb ab 2015 werden dann das Geschäftsmodell sowie Umsatzziele der Betreiber und Hersteller dieser Transportsysteme bewertbar sein.

14.4 Erfahrungen bei der Umsetzung des Transportsystems

Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über die Erfahrungen bei der Umsetzung des selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems „Navia“ der Firma Induct an der Stanford Universität geben. Da die Fahrzeuge bis Mitte 2014 nur sporadisch im Einsatz waren, ist dies ein erster Erfahrungsbericht, der an anderer Stelle und zu späterer Zeit fortgesetzt werden soll. Allerdings können jetzt schon Erfahrungen über die Vorgehensweise bei der Einführung vermittelt werden, die für andere Wissenschaftler und Verkehrsplaner bei der Umsetzung ähnlicher Transportsysteme hilfreich sein können.

14.4.1 Evaluations-, Versuchs- und Öffentlichkeitsbetrieb

Für die hier dargestellten Fahrzeuge werden entsprechend Tab. 14.1 verschiedene Betriebsphasen betrachtet, um das Transportsystem zunächst in einer Evaluationsphase zu klassifizieren, dann in einer Versuchsphase zu optimieren und schließlich im Öffentlichkeitsbetrieb anzubieten.

Zunächst müssen generelle Erfahrungen mit den Fahrzeugen gesammelt werden, da ein derartiges Transportsystem noch weitestgehend unbekannt und die Risikobewertung damit

Tab. 14.1 Abgrenzung und Charakteristiken der drei Betriebsphasen

	Evaluation	Versuch	Öffentlichkeit
Zielsetzung	Risikobewertung, Eignung f. Forschung	Forschungsprojekt, Betriebs- optimierung	Personentransport als Dienstleistung
Betriebsgebiet	abgeschlossen, begrenzt	teilöffentlich, begrenzt	öffentlich, begrenzt
Betriebszeiten	begrenzt, Kurzzeitversuch	begrenzt, Langzeitversuch	unbegrenzt, prinzipiell 24h
Nutzergruppe	Projektbeteiligte	ausgewählte Versuchsteilnehmer	generelle Öffentlichkeit
Überwachung	Betriebspersonal am Fahrzeug	Betriebspersonal am Fahrzeug, Funkverbindung	Betriebspersonal in Funkverbindung

schwierig ist. Gleichzeitig ergeben sich weitere Fragestellungen für die Forschung. Das hier verwendete System ermöglicht einen sehr flexiblen Betrieb für die entsprechenden Belange. Für den anfänglichen Evaluationsbetrieb ist es vorteilhaft, dass die Fahrzeuge relativ einfach auf ein gewünschtes Betriebsgebiet eingerichtet und dann vom Betriebspersonal überwacht werden können. Dabei ist es sehr hilfreich, dass die Fahrzeuge kaum eine spezielle Infrastruktur benötigen, sondern nach dem Einrichten weitgehend autark operieren.

Der nachfolgende Versuchsbetrieb, in dem entsprechend den Zielsetzungen des Autonomous Systems Laboratory [8] die räumliche sowie zeitliche Verteilung selbstfahrender und individuell abrufbarer Fahrzeuge zu optimieren ist, soll dann möglichst realitätsnah erfolgen. Das bedeutet, dass Nutzer des Systems sich trotz des Versuchsbetriebs wie im Fall eines realen Mobilitätsbedarfs verhalten können. Also sollen sie beispielsweise einen Fahrtgrund haben, warum sie mit einer möglichst kurzen Warte- und Fahrtzeit von einem Ort zum anderen kommen wollen. Auch dieser Betrieb ist mit dem verwendeten Transportsystem recht flexibel und zielgerichtet darzustellen, da die angebotenen Fahrtrouten sowie Haltestellen vergleichsweise einfach zu programmieren sind und damit die Anforderungen für den Versuchsbetrieb effizient umgesetzt werden können.

Der Versuchsbetrieb würde schließlich in den eigentlichen Öffentlichkeitsbetrieb übergehen, in dem bis auf Weiteres keine wissenschaftlichen Untersuchungen oder Optimierungen mehr geplant wären, sondern der Betrieb entsprechend den Ergebnissen aus dem Versuchsbetrieb umgesetzt wird. Das hier verwendete Transportsystem ermöglicht diese schrittweise Einführung, da das Betriebsgebiet und die Betriebszeiten recht einfach festzulegen sind und aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit und Fahrstrecke eine Betriebsüberwachung problemlos ist.

14.4.2 Auswahl des Fahrzeugkonzepts

Um den Anforderungen für den Versuchsbetrieb gerecht zu werden, ist ein vollautomatisiertes, d. h. ohne Fahrer operierendes Fahrzeug erforderlich, das innerhalb gegebener Grenzen selbstfahrend ist und von Nutzern individuell abgerufen werden kann. Zusätzlich ist eine offene Betriebsarchitektur erforderlich, sodass die Bereitstellung und Verteilung der Fahrzeuge für den Versuchsbetrieb variiert werden können. Die Fahrzeuge selbst müssen nicht notwendigerweise über eine offene Architektur verfügen; das Betriebssystem der individuellen Fahrzeugsteuerung oder die Umfelderkennung sind nicht Gegenstand der Forschungsarbeiten und brauchen deswegen auch nicht weiter beeinflusst oder gar verändert zu werden.

Die von der Firma Induct angebotenen Fahrzeuge „Navia“ mit der zugehörigen Betriebsarchitektur erfüllen diese Anforderungen. Zusätzlich liegen bereits Erfahrungen von anderen Implementierungen dieses Mobilitätskonzepts vor [3, 7], was einen stabilen Versuchsbetrieb erwarten lässt. Darüber hinaus hat Induct seine Schutzrechte bezüglich des Navia vorwiegend auf dem Gebiet der Umfelderkennung und Erstellung des Referenzsystems für die Fahrzeugautomatisierung, sodass die hier betrachtete Forschungsarbeit auf dem Gebiet des übergeordneten Fahrzeugbetriebs zur optimalen Nachfragebedienung kaum eine Überschneidung darstellt, sondern vielmehr eine Ergänzung. Aus diesen Gründen heraus wurde das Induct Navia-Konzept für die Arbeiten des Autonomous Systems Laboratory an der Stanford Universität [8] für den Versuchsbetrieb in Betracht gezogen und entsprechend den in den nachfolgenden Abschnitten benannten Kriterien bewertet.

14.4.3 Risikobewertung und Rechtseinordnung

Die Einordnung in das Rechtssystem erfolgt für den hier betrachteten Einsatzfall schrittweise. Da die Fahrzeuge zunächst für die Evaluation in nicht allgemein zugänglichen Gebieten betrieben werden, gelten dort Sonderregelungen bezüglich Fahrzeugbetrieb und Betriebshaftung. Diese konnten an der Stanford Universität im Einvernehmen mit der Abteilung für Risikobewertung sowie der Rechtsabteilung formuliert werden. Die Haftung wird im Wesentlichen beim Betreiber der Fahrzeuge belassen, was je nach Betriebszustand das im bzw. am Fahrzeug anwesende oder über Funküberwachung verbundene Betriebspersonal ist. Der Betrieb der Fahrzeuge wird mit entsprechenden Auflagen der internen (d. h. der Stanford Universität angehörigen) Stellen für Risikobewertung zugelassen.

Die Risikobewertung für den hier betrachteten Betriebsfall ist deutlich einfacher planbar als dies für den öffentlichen Straßenverkehr der Fall ist, da sowohl die Fahrgeschwindigkeit als auch das Einsatzgebiet deutlich begrenzt sind. Das bedeutet, dass anders als bei konventionellen Pkw, die deutlich schneller und prinzipiell überall fahren können, die Begrenzung auf maximal 20 km/h und ein eng umrissenes Gebiet zu einem vergleichsweise geringen Betriebsrisiko führen. Im Einsatzgebiet wird für den hier betrachteten Fall zunächst nur der Betrieb unter Ausschluss der Öffentlichkeit bzw. unter direkter Aufsicht durch das Betriebspersonal, unmittelbar im oder am Fahrzeug, zugelassen. Diese Beschrän-

kungen erlauben es, über erste Schritte beim Betrieb der Fahrzeuge allen Projektbeteiligten ein Verständnis für die Möglichkeiten, Beschränkungen und weiteren Eigenschaften zu vermitteln. Damit können dann schrittweise die Risikobewertung und Rechtseinordnung vorgenommen und letztlich auch der eigentliche Versuchsbetrieb ausgeweitet werden. Das bedeutet, dass Risikobewertung und Rechtseinordnung aufgrund des neuen und weitgehend unbekannten Charakters der Fahrzeuge am praktischen Beispiel erfolgen und kaum im Voraus festgelegt werden können.

Mit der zunehmenden Ausweitung des Betriebes auf den Versuchs- und dann den Öffentlichkeitsbetrieb (s. Tab. 14.1) gelten zunehmend öffentliche Gesetzgebungen, sofern die Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen betrieben werden. Für den hier betrachteten Anwendungsfall gelten die kalifornischen Regelungen, die in der ersten Hälfte des Jahres 2014 noch in einer abschließenden Gesetzgebungsphase waren. Dabei ist besonders anzumerken, dass ab September 2014 nur noch *Fahrzeughersteller* Versuche mit „autonomen“ (also selbstfahrenden oder vollautomatisierten) Fahrzeugen vornehmen dürfen [9]. Da als „Fahrzeughersteller“ definiert wird, wer ein Fahrzeug zu einem „autonomen“ Fahrzeug verändert, wird an dieser Stelle zu sehen sein, auf welchen Verkehrswegen die Fahrzeuge an der Stanford Universität bewegt werden und wer der Fahrzeughersteller im Sinne der kalifornischen Gesetzgebung ist. Solange die Fahrzeuge von der Stanford Universität nicht im Sinne der Automatisierung verändert, sondern lediglich Daten über deren Position, Zeitverhalten und Nutzeranforderungen ausgewertet und optimiert werden, wird erwartet, dass nicht die universitären Wissenschaftler als der Fahrzeughersteller im Sinne des Gesetzes anzusehen sind, sondern der eigentliche Hersteller der Fahrzeuge, von dem die Stanford Universität diese bezogen hat.

Allerdings ist die Gesetzeslage derzeit schwer vorherzusagen, da sie sich noch in der Entstehungsphase befindet. Es ist zu erwarten, dass auf den verschiedensten gesetzgebenden Ebenen (d. h. auf bundesstaatlichen, kommunalen, aber auch nationalen Ebenen) noch Veränderungen auftreten werden, auf die zu reagieren sein wird. Generell scheint sich für das hier betrachtete Betriebsgebiet, d. h. eine innovative Universität in Kalifornien, eine sehr positive Grundhaltung der Verantwortlichen und der Öffentlichkeit gegenüber automatisierten Fahrzeugen zu ergeben. Und auch die gesetzgebenden Organe scheinen eher eine unterstützende und wohlwollende Haltung einzunehmen. Es ist auch zu verspüren, dass im Einzelfall Sonderregelungen erreicht werden können, um einen Betrieb zu ermöglichen, der durch die Gesetzeslage möglicherweise nicht eindeutig definiert ist. Eine derartige Grundhaltung wird auch in anderen Teilen der USA beobachtet, sodass die Gesetzgebung kein grundsätzliches Hindernis bei der Einführung automatisierter Fahrzeuge zu sein scheint, sondern eher eine zusätzliche Prüfungsinstanz.

14.4.4 Vertragsgestaltung

Für den Betrieb des selbstfahrenden und individuell abrufbaren Transportsystems ist ein Vertrag erforderlich, der im Wesentlichen die Rechtsbeziehung zwischen dem Eigentümer

des Fahrzeugs (für den hier betrachteten Versuchsbetrieb ist das der Hersteller) und dem Nutzer (hier die Stanford Universität als Forschungsbetreiber) festlegt. Darin eingeschlossen sind Rechte und Pflichten bezüglich der generellen Nutzung, Information und Kommunikation, Wartung, Haftung und anderer Bestimmungen für den Versuchsbetrieb.

Im vorliegenden Fall wird ein Leihvertrag für ein selbstfahrendes Fahrzeug zwischen dem Eigentümer und dem Nutzer des Fahrzeugs geschlossen, der zunächst nur für die Evaluationsphase zur Vorbereitung eines eventuellen Forschungsprojekts gilt. Sobald ein konkretes Forschungsprojekt mit dem selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystem verfolgt würde, wäre ein neuer oder eventuell auch zusätzlicher Vertrag notwendig, der dann für den konkreten Anwendungsfall alle zuvor genannten Gegebenheiten regelt sowie zusätzlich beispielsweise die Möglichkeiten, für Forschungszwecke in die Umfelderkennung und Routenplanung einzugreifen, was für die Evaluationsphase nicht vorgesehen ist.

In dem für die Evaluationsphase eingesetzten Vertrag zwischen Eigentümer und Nutzer der Fahrzeuge wird die Haftung für den Betrieb dem Betreiber auferlegt. Dabei ist der Betreiber die Rechtsperson, die den Betrieb eines solchen Fahrzeugs initiiert und überwacht, also entweder das Betriebspersonal im oder am Fahrzeug oder das Betriebspersonal, welches über eine Funkverbindung mit dem Fahrzeug verbunden ist.

14.4.5 Auswahl des Betriebsgebiets und der Betriebsszenarien

Das Betriebsgebiet für das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem ist zunächst räumlich zu begrenzen. Für den anfänglichen Evaluations- und anschließenden Versuchsbetrieb mit dem Transportsystem ist weniger die Größe des Betriebsgebiets von Interesse, als vielmehr die Vielfalt der Nutzer, Anwendungsfälle und Betriebs-situationen. Diese können für den Evaluations- und Versuchsbetrieb auch proaktiv als Bestandteil eines Versuchsablaufs dargestellt werden, d. h., Beteiligte des Versuchsprojekts können verschiedene Situationen darstellen, sodass das Verhalten der Fahrzeuge beobachtet und bewertet werden kann. Damit kann ein kleines Betriebsgebiet durchaus ausreichen, um eine Vielzahl von Situationen und Betriebszuständen bewerten zu können.

Da es sich bei dem selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystem um ein neuartiges Konzept handelt, dessen Risikobewertung nur begrenzt auf der Grundlage von Erfahrungswerten erfolgen kann, muss das Einsatzgebiet so ausgesucht werden, dass zunächst ein realitätsnaher, aber doch vollständig kontrollierbarer Einsatz sichergestellt ist. Das bedeutet, dass entsprechende Nutzer die Fahrzeuge innerhalb des Betriebsgebietes individuell abrufen, ein Fahrziel eingeben und das Fahrzeug die entsprechende Fahraufgabe ohne direkten Einfluss des Betriebspersonals ausführt. Dabei muss das Betriebspersonal aber die Fahrzeuge überwachen können, und es sollte für diesen anfänglichen Versuchsbetrieb auch Kontrolle oder zumindest Wissen darüber haben, welche Personen und Fahrzeuge sich in dem Betriebsgebiet aufhalten und somit mit den Fahrzeugen interferieren könnten.

Die Übersicht über die Personen im Betriebsgebiet ist wichtig, um das Potenzial für Kollisionen oder sonstige Störungen zu erkennen und damit zu minimieren. Beispielsweise sollten sich zu Beginn keinerlei Personen im Betriebsgebiet der Fahrzeuge aufhalten, die nicht mit dem Transportsystem vertraut sind bzw. sich nicht entsprechend den geltenden Vorgaben verhalten (z. B. vor das fahrende Fahrzeug treten). Vielmehr muss sichergestellt sein, dass alle Personen mit den Charakteristiken und Risiken des Transportsystems vertraut sind, sich aber dennoch wie reale Nutzer verhalten, die die Fahrzeuge anfordern und Fahrziele eingeben. Dabei kann in Betracht gezogen werden, dass alle Personen, die mit den Fahrzeugen interagieren, ihre Einverständniserklärung abgeben, dass sie mit den Eigenschaften und Beschränkungen vertraut sind und ihr eigenes Verhalten dementsprechend ausrichten werden.

Nach einem anfänglich stark eingeschränkten Betriebsgebiet, welches aufgrund der zuvor beschriebenen Gründe eventuell sogar eingezäunt und nur mit besonderer Genehmigung zugänglich sein mag, sollte der Betrieb auf ein zwar überwachtes, aber ansonsten öffentliches Betriebsgebiet erweitert werden, damit eine große Anzahl von realen Nutzern ermöglicht wird. Das bedeutet, dass die Nutzer in dieser Phase keine Vorkenntnis bezüglich des Systems haben und auch keine gesonderte Einverständniserklärung abgeben, sondern die Fahrzeuge genauso benutzen wie beispielsweise ein Taxi oder einen Bus. Dafür ist es wichtig, dass das Betriebsgebiet einen Bereich beschreibt, in dem die Nutzer einen Mobilitätsbedarf haben, für den die hier betrachteten Fahrzeuge aufgrund der Reichweite, Fahrgeschwindigkeit und Transportkapazität eine reale Lösung darstellen.

Eine Universität wie Stanford hat die Möglichkeit, die hier beschriebenen Anforderungen umzusetzen: Der Universitätscampus hat eine Ausdehnung, die für ein Fahrzeug wie den Navia befahrbar ist; der Transportbedarf für Personen und Gegenstände ist hoch; die Verkehrsbelange werden weitestgehend von der zuständigen Abteilung der Universität (Parking & Transportation Services) koordiniert. Damit kann für den anfänglichen Evaluationsbetrieb ein abgegrenztes Gebiet ausgewiesen werden, zu dem nur Versuchsbeteiligte Zugang haben. In der nächsten Phase können dann beispielsweise Fußgängerzonen und Straßen ausgewiesen werden, auf denen die Fahrzeuge betrieben werden. In allen Fällen lässt sich sicherstellen, dass die erforderlichen Kommunikationssysteme zur Überwachung durch das Betriebspersonal zur Verfügung stehen und das Personal bei Bedarf Zugang zu den Fahrzeugen hat.

Nachdem bekannt geworden war, dass die Navia-Fahrzeuge an der Stanford Universität eingesetzt werden sollen, ergeben sich sehr schnell mehrere Anfragen von interessierten Abteilungen, das Transportsystem einzusetzen. Diese Anfragen kommen von den Betreibern der lokalen Busse, um eine punktuelle und flexible Erweiterung des Linienbetriebs anzubieten; von den Versorgungs- sowie Instandsetzungsabteilungen, um einen flexiblen und personalungebundenen Transport von Gegenständen auf dem Campus zu ermöglichen; sowie von den Betreibern einer separaten Forschungseinrichtung, um einen Personentransport auf dem abgegrenzten Forschungscampus einzurichten.

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Anfragen und Möglichkeiten wird zunächst der Betrieb auf einem zugangsgeregelten Parkplatz verfolgt, wo verschiedene Betriebs-

szenarien nachgestellt werden können. Danach wird der realitätsnahe Einsatz auf dem Gelände der separaten Forschungseinrichtung geplant, wo eine größere Zahl realer Nutzer erwartet wird und jederzeit eine vollständige Überwachung des Betriebs gewährleistet werden kann.

Zu Beginn des Evaluationsbetriebs sind dann spezielle Szenarien abzubilden, die die Risikobewertung und entsprechende Sicherheitstests ermöglichen. Dafür sind die Fahrzeuge beispielsweise mit Hindernissen und anderen Objekten zu konfrontieren. Es sollen reale sicherheitsrelevante Situationen abgebildet werden, in denen die Fahrzeuge sich in geforderter Art und Weise so verhalten, dass sich keine kritischen Betriebszustände ergeben. Die Objekte, mit denen die Fahrzeuge konfrontiert werden, sind Fußgänger, Radfahrer, Fahrzeuge aller Art, Tiere und ganz allgemein Gegenstände, die es in dem Betriebsgebiet gibt, wie beispielsweise Mülltonnen, Pakete, Kartons, Arbeitsmaterial, Pflanzen, Gebäude usw.

Dabei sind stationäre von beweglichen Objekten zu unterscheiden, da erstere in der digitalen Umgebungskarte definiert werden können und die Bahn der Fahrzeuge dementsprechend vorgegeben werden kann. Bewegliche Objekte – in diesem Fall auch solche Objekte, die nur selten und nur durch Fremdeinwirkung bewegt werden können wie z. B. ein Schuttcontainer – müssen vollständig von der Umfeldsensorik erfasst werden, um eine Kollision zu vermeiden. Je nach Eigenart des Objekts sind Betriebsszenarien zu definieren, sodass ein für die Risikobewertung und für Sicherheitstests relevantes Verhalten dargestellt wird: Personen und Fahrzeuge sollten relativ kurzfristig und schnell vor das Fahrzeug gelangen können, Mülltonnen und Pakete eher langsamer. Für alle diese Objekte ist das Verhalten der Fahrzeuge dahingehend zu bestimmen, inwieweit das Objekt rechtzeitig und zuverlässig genug erkannt und eine Kollision vermieden wird.

14.4.6 Einrichtung des Transportsystems und Zertifizierung des Personals

Der Hersteller der Fahrzeuge legt fest, wie das Transportsystem mit den selbstfahrenden Fahrzeugen einzurichten ist. Dazu erfolgt zunächst die Festlegung der Route, die dann mit einem der Fahrzeuge in einem speziellen Betriebsmodus befahren wird, um die digitale Karte des Betriebsgebiets zu erstellen. Die Betriebsdaten werden anschließend editiert, um stationäre und bewegliche Hindernisse zu kategorisieren. Der Hersteller stellt abschließend über die Einsatzart und das Betriebsgebiet ein Dokument aus, das die Parameter und Begrenzungen definiert und damit den zulässigen Betrieb auch für eventuelle Haftungsfragen genau festlegt. Diese Festlegungen werden in einem Zertifikat des Herstellers dokumentiert.

Zur Zertifizierung des Betriebspersonals erfolgt eine Einweisung durch den Hersteller, bei der operative Anforderungen, funktionale Merkmale, Betriebsarten, technische Details, Einschränkungen, Risiken usw. erklärt werden und das Verständnis des Systems im praktischen Umgang erlernt und dann auch abgeprüft werden. Der Hersteller dokumentiert die Zertifizierung und beurkundet damit, welche Personen die Ausbildung absolviert haben

und mit dem System vertraut sind. Festgelegt ist auch anhand der drei Stufen „Betrieb“, „Einrichtung“ und „Wartung/Modifikation“, ob die Personen das System lediglich betreiben, für den Betrieb einrichten oder auch warten und verändern dürfen.

Diese Abläufe und Umfänge müssen zunächst vom Hersteller der Fahrzeuge vorgegeben sein, da dieser die beste Kenntnis über das System sowie deren Risiken hat. Um eventuelle Besonderheiten der Betriebsumgebung zu berücksichtigen, sollte allerdings der Betreiber des Systems (d.h. nicht der Hersteller, sondern der verantwortliche Beobachter vor Ort oder in Funkverbindung) Änderungen oder Erweiterungen für Systemtest, Wartung und Zertifizierung vornehmen, da hier Sondersituationen am ehesten offenbar werden. Wenn in Zukunft derartige selbstfahrende und individuell abrufbare Transportsysteme weitere Verbreitung erfahren und damit die Gesetzgeber auch mehr Erfahrung gesammelt haben, sind entsprechende Abläufe und Umfänge für die Zertifizierung von Fahrzeug und Personal wahrscheinlich eher vom Gesetzgeber oder von beauftragten Institutionen zu erstellen.

14.4.7 Systemstart und Betriebsüberwachung

Für den eigentlichen Betrieb der Fahrzeuge gibt der Hersteller einen Systemstart mit einer entsprechenden Systemüberprüfung vor. Dabei wird eine Vielzahl von Fahrzeug- und Umgebungsparametern überprüft, bevor die Freigabe für den eigentlichen Betrieb erfolgt. Der vorgegebene Ablauf stellt einen guten Kompromiss aus Detailgenauigkeit und Handhabbarkeit dar, sodass vor jedem Betrieb Gewissheit besteht, dass sowohl das Transportsystem als auch die Betriebsumgebung den Sicherheits- und Funktionsanforderungen entsprechend dem zertifizierten Betrieb genügen. Ebenso sind Wartungsumfänge mit verschiedenen Intervallen vorgegeben, die Sicherheit und Funktion langfristig sicherstellen sollen.

Für den Betrieb der Fahrzeuge im Falle einer Funküberwachung (d.h. kein Betriebspersonal befindet sich unmittelbar im oder am Fahrzeug) sieht der Hersteller eine redundante Kommunikation vor. Dazu werden zwei voneinander unabhängige drahtlose Kommunikationssysteme, beispielsweise Mobiltelefon- und WLAN-Netz oder zwei unabhängige Mobiltelefonnetze, implementiert, über die das Betriebspersonal Fahrzeugdaten abrufen, gegebenenfalls einen Nothalt einleiten oder auch mit den Insassen des Fahrzeugs kommunizieren kann. Die genauen Überwachungsumfänge, beispielsweise Position, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, Insassen und Türverriegelung oder aber auch die komplette Videoüberwachung der Umgebung, sind individuell festzulegen, jedoch derzeit (Juni 2014) noch nicht genau bestimmt.

Bisher wurden die Fahrzeuge an der Stanford Universität nur mit dem Betriebspersonal unmittelbar im oder am Fahrzeug und mit direktem Zugriff auf einen Notfallschalter betrieben. Aus diesem Grund liegen noch keine erweiterten Erfahrungen zum Betrieb mit Funküberwachung vor. Allerdings ist bereits aus dieser begrenzten Erfahrung die Wahrscheinlichkeit zu erkennen, dass eine Kollision eher auf einen anderen Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, anderes Fahrzeug) zurückzuführen ist als auf das Fahrzeug selbst.

Die Kombination der verwendeten Umfelderkennung, Objektklassifizierung und Routenbestimmung ist also geeignet – ganz besonders in Anbetracht der geringen Fahrgeschwindigkeit und des bekannten sowie begrenzten Betriebsumfelds –, um das Fahrzeug sehr sicher und störungsfrei zu führen.

Für den späteren Betrieb mit Funküberwachung wird zu bewerten sein, wie schnell das Betriebspersonal im Störfall vor Ort sein könnte. So könnte es vorkommen, dass die vorprogrammierte Route durch Baumaßnahmen oder auch widerrechtlich geparkte Fahrzeuge versperrt ist. In solch einem Fall würden die Fahrzeuge den Betrieb selbsttätig unterbrechen und die Betriebsstelle informieren. Je nachdem, wo das Betriebspersonal dann lokal angesiedelt ist, wird eine Zeit in der Größenordnung von Minuten oder auch deutlich länger vergehen, bis jemand vor Ort sein wird, um die Störung zu beheben. Dieses Modell ist dem Betrieb von Fahrstühlen entnommen, wo die Notruftaste auch einen sofortigen Kontakt zu einer Betriebszentrale herstellt, das Betriebspersonal möglicherweise aber eine längere Zeit benötigt, bis es vor Ort sein kann. Wie die Nutzer und Insassen des selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems damit umgehen bzw. ob diese Zeitdauer ein Problem darstellt, ist im späteren Öffentlichkeitsbetrieb zu ermitteln. Im Unterschied zum Fahrstuhl ist aber festzuhalten, dass die Passagiere des Transportsystems aufgrund der offenen Bauweise zu jeder Zeit direkten Kontakt zur Umgebung haben und die Fahrzeuge (s. Abb. 14.2) im Notfall auch vergleichsweise einfach verlassen können.

14.4.8 Information für Nutzer und Passanten

Da es sich bei dem selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystem um eine Neuerung im Personentransport handelt, müssen die Nutzer über die Möglichkeiten und Risiken aufgeklärt werden. Zunächst sollte der normale Betrieb erläutert werden, d. h. die eigentliche Bedienung ist zu beschreiben. Hierfür sollte nur ein Mindestmaß an Beschreibung vorgesehen werden, da das Transportsystem eine ähnliche Nutzung wie ein Taxi oder Bus ermöglichen soll, die beide auch keine Beschreibung erfordern. So ist eher auf die Risiken und auf die speziellen Aspekte des Versuchsbetriebs hinzuweisen. Das beinhaltet eine Aufklärung über die Grenzen des Systems und dessen Gefahren, wie beispielsweise die Möglichkeit, dass ein Objekt nicht rechtzeitig erkannt wird, aber auch das Verhalten im Ausnahmefall.

Die Nutzer für den Evaluations- und Versuchsbetrieb werden über die Eigenschaften und Risiken in einer schriftlichen Information aufgeklärt. Dazu gehört auch die Information, an wen sich die Nutzer in einem eventuellen Schadensfall als rechtlich Verantwortlichen wenden sollen. Ähnlich sind im späteren Öffentlichkeitsbetrieb Möglichkeiten vorzusehen, dass die Nutzer dem Betreiber Rückmeldung und Fragen zukommen lassen können. Da es sich um ein neues Transportsystem handelt, ist die Nutzerbewertung von großer Bedeutung; deswegen ist es wichtig, dass die Nutzer wissen, an wen sie sich wenden können.

Ebenso wie die eigentlichen Nutzer des selbstfahrenden Transportsystems müssen auch Passanten und andere Verkehrsteilnehmer über den Betrieb der Fahrzeuge aufgeklärt

werden. Zwar ist nicht unbedingt Wissen über die Nutzung erforderlich, angesichts der Interaktion zwischen den Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern müssen diese aber über die Möglichkeiten und Risiken in Kenntnis gesetzt werden. Das schließt ganz besonders auch Vorfahrtsregelungen oder Sonderregelungen mit ein. Passanten und andere Verkehrsteilnehmer sollten wissen, wie sie die Fahrzeuge im Notfall gegebenenfalls von außen stoppen können, indem sie den Notfallschalter betätigen. Auch sollte den Passanten der offizielle Betreiber der Fahrzeuge bekannt sein, an den sie sich mit Rückmeldungen und Fragen wenden können.

14.4.9 Öffentliche Reaktionen

Auch wenn das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem bisher nur in begrenztem Maße in der Öffentlichkeit an der Stanford Universität zu sehen war (das war bislang nur der Fall, wenn das Fahrzeug vom Betriebspersonal gesteuert zu einem anderen Betriebsgebiet überführt wurde), kann über die öffentlichen Reaktionen doch schon einiges ausgesagt werden. Diese Beobachtungen wurden bei Überführungsfahrten und Besuchen beim Evaluationsbetrieb, aber auch an der Parkposition der Fahrzeuge gemacht.

Dabei sei ganz besonders betont, dass es sich bei den folgenden Beschreibungen nicht um eine methodische Studie handelt, sondern eher um zufällige Beobachtungen, die für weitere Untersuchungen Anregung geben sollen.

Generell gilt, dass die Öffentlichkeit, also alle Unbeteiligten an diesem Projekt, sehr positiv auf das Fahrzeug reagieren. Das mag zwei Hauptursachen haben:

Zum einen scheinen unbeteiligte Passanten oder Betrachter generell sehr interessiert und neugierig in Bezug auf automatisierte Fahrzeuge zu sein. Das liegt möglicherweise daran, dass derartige Technologien derzeit sehr intensiv in der allgemeinen Medienberichterstattung behandelt werden, aber auch in populärwissenschaftlichen Beiträgen und Fachartikeln ein zentrales Thema sind. Vor allem die allgemeinen Medien berichten häufig sehr positiv und zuweilen sogar euphorisch über „autonome“ Fahrzeuge, bei denen der Mensch die Fahraufgabe komplett an den Computer übergibt und zwischen Start und Ziel anderen Tätigkeiten nachgehen kann. Wenn Menschen unter diesem Eindruck zum ersten Mal ein solches Fahrzeug sehen, sind Neugierde, Offenheit und Vertrauensvorschuss vermutlich naheliegende Reaktionen, die immer wieder beobachtet werden konnten.

Zum anderen trägt der Charakter des hier betrachteten Fahrzeugs zu einer spontanen, positiven Reaktion von Passanten und Betrachtern bei. Das Fahrzeug hat eine sehr offene Bauweise (s. Abb. 14.2), so z. B. offene Seitenwände ohne Fenster oder eine offene Reling anstelle einer geschlossenen Tür. Durch diese Bauweise sind die Insassen des Fahrzeugs klar zu erkennen und für Passanten wahrnehmbar, was einen positiven Eindruck vermittelt. Das bedeutet, das Erscheinungsbild ist ganz anders, als wenn das Fahrzeug beispielsweise getönte Scheiben und geschlossene Türen hätte, sodass Passanten nicht wüssten, wer in dem selbstfahrenden Fahrzeug unterwegs ist. Ähnliches kann beispielsweise im öffentli-

chen Straßenverkehr beobachtet werden, wenn man die Eindrücke vergleicht, die beispielsweise eine verdunkelte Limousine oder ein offenes Cabrio vermitteln. Für das hier betrachtete Fahrzeug kommt hinzu, dass das Design Elemente aus dem Bootsbau aufgreift, so beispielsweise weißen Kunststoff für den Aufbau, beigefarbenes Kunstleder für die Passagierplätze, helles Teakholz für den Fußboden sowie ein nahezu segelartiges Dach. Die Reaktionen von Betrachtern des Fahrzeugs reichen von „Landyacht“ bis hin zu „Whirlpool auf Rädern“ – alles positive Assoziationen, die den ersten Eindruck bestimmen.

Darüber hinaus ist das Fahrzeug vergleichsweise langsam; es operiert oft kaum schneller als mit Schrittgeschwindigkeit. Dadurch bekommen Passanten den Eindruck von Sicherheit: Fußgänger empfinden, dass sie zur Not schnell beiseitretreten könnten; Autofahrer fühlen sich diesem Fahrzeug wahrscheinlich „überlegen“, was auch an dessen weitestgehend aus Plastikteilen bestehendem Erscheinungsbild liegen mag. Aufgrund dieser Fahrzeugcharakteristiken – offenes und positives Erscheinungsbild sowie langsame Fahrgeschwindigkeit – ergibt sich, dass Unbeteiligte dem Fahrzeug nahezu einen persönlichen Charakter zuordnen, ähnlich wie das beispielsweise in Filmen wie „Nr. 5 lebt“, „Matrix“ oder „Krieg der Sterne“ der Fall ist. Auch dort ist zu beobachten, dass Robotern je nach Erscheinungsbild und Leistungsfähigkeit bzw. Aggressivität (ausgedrückt durch Fahrgeschwindigkeit) unterschiedliche Charaktere zugeordnet werden. Diese Eigenschaften und Mechanismen sollten vorsichtig in Betracht gezogen werden, wenn ein selbstfahrendes Fahrzeug in der Öffentlichkeit eingesetzt wird. Es scheint so zu sein, dass der Charakter eines Fahrzeugs ein wichtiger Bestandteil ist, um in der Öffentlichkeit positive Reaktionen zur Fahrzeugautomatisierung auszulösen, d. h. dass das automatisierte Fahrzeug durch entsprechende Mechanismen entweder als „untergebener Diener“ oder „rücksichtsloser Söldner“ wahrgenommen wird (s. hierzu auch Kap. 3).

Aus den Begegnungen mit Passanten und Beobachtern ergeben sich immer wieder viele Fragen zu dem selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystem. Die häufigste Frage ist, wann und wo diese Fahrzeuge in der Öffentlichkeit nutzbar sein werden. Andere Fragen beziehen sich auf technische Spezifikationen der Fahrzeuge. Mitunter wird auch gefragt, ob und wie die Fahrzeuge auf Objekte reagieren, wobei ganz gezielt nach Fußgängern, Hunden, Katzen oder stationären Hindernissen gefragt wird. Gelegentlich ergeben sich auch Fragen zur Überwachung und Betriebshaftung der Fahrzeuge. Diese Fragen belegen allgemein das öffentliche Interesse an den Fahrzeugen und auch, dass die Öffentlichkeit sich viele Gedanken zum Betrieb sowie zu Beschränkungen von automatisierten Fahrzeugen macht. Das unterstreicht auch, dass eine Aufklärung und Information der Öffentlichkeit vor bzw. während des Betriebs dieser Fahrzeuge wichtig ist.

14.5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag beschreibt die ersten Schritte zur Einführung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems. Bei dem Transportsystem handelt es sich um Fahrzeuge, die per Smartphone-App abrufbar sind und Personen innerhalb eines fest-

gelegten Gebiets, wie beispielsweise eines Innenstadtbereichs, ohne direkte Eingriffsmöglichkeit und ohne Schienenführung befördern. Im hier beschriebenen Beispiel sollen diese Fahrzeuge an der Stanford Universität für wissenschaftliche Untersuchungen auf dem Gebiet innovativer Mobilitätslösungen mittels selbstfahrender Transportsysteme betrieben und dazu zunächst bezüglich ihrer Tauglichkeit für diese Arbeiten bewertet werden.

In den ersten Schritten wurden die Risikobewertung sowie Rechtseinordnung vorgenommen und dann das Betriebsgebiet sowie die Betriebsszenarien festgelegt. Dabei zeigte sich, dass zwar auf bestehende Regelungen und Vereinbarungen aufgebaut werden kann, das hier betrachtete Transportsystem durch den selbstfahrenden Charakter aber Anforderungen hat, die deutlich über das Bestehende hinausgehen. Dabei war es in allen Fällen von Vorteil, dass die Fahrzeuge langsam fahren (maximal 20 km/h) und ihr Einsatzgebiet begrenzt ist. Zusätzlich ist Betriebspersonal entweder direkt im oder am Fahrzeug oder per Funkverbindung mit dem Fahrzeug verbunden, was die Ersteinführung eines solchen Systems erleichtert.

Bei den notwendigen internen Koordinationsaufgaben sowie zu erstellenden Regelungen hat es sich als sehr wichtig erwiesen, den Betroffenen bzw. Entscheidern das Transportsystem im realen Einsatz vorzuführen, sodass das Betriebsrisiko sowie Möglichkeiten und Grenzen der Fahrzeuge realistisch eingeschätzt werden können. Das offene und positive Erscheinungsbild der Fahrzeuge gepaart mit großem Interesse sowie Neugierde in der Öffentlichkeit trägt dazu bei, dass die Fahrzeuge positive Reaktionen auslösen. Daran sind auch Erwartungen von Verbrauchern geknüpft, dass selbstfahrende Fahrzeuge in absehbarer Zeit vielen das oftmals lästige Autofahren in der Stadt abnehmen werden.

Die Unsicherheiten bei der Einführung des selbstfahrenden Personentransportsystems sind neben infrastrukturellen, betriebswirtschaftlichen sowie unternehmerischen Variablen durchaus auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen. In dem hier betrachteten Beispiel der Einführung eines solchen Transportsystems an der Stanford Universität, die letztlich einen lokalen Rechtsbereich innerhalb des Bundesstaats Kalifornien darstellt, zeigt sich, dass der Betrieb auf Stanford-eigenem Gebiet vorteilhaft ist, da die Universität hier entsprechende Regelungen vorgeben kann. Allerdings wird derzeit für Kalifornien eine Gesetzesregelung für den Betrieb automatisierter Fahrzeuge verfasst, die dann für Durchgangsstraßen an der Universität auch rechtswirksam wäre. Damit wird in naher Zukunft zu sehen sein, wie die Rechtsprechung derartige selbstfahrende Fahrzeuge behandelt und wie der Betrieb bzw. die Ausführung des Transportsystems geartet sein muss.

Abschließend ergibt sich für den Ausblick zumindest aufgrund der hier gefundenen ersten Erfahrungen eine weitgehend positive Grundstimmung, als dass der Einführung selbstfahrender Transportsysteme in der Öffentlichkeit sehr wohlwollend gegenüberstanden bzw. diese gefördert wird. Es ist dabei allerdings anzumerken, dass diese ersten Eindrücke noch keine repräsentative Studie darstellen, sodass noch weitere Arbeiten zu Umsetzung und Akzeptanz selbstfahrender Fahrzeuge vorgeschlagen werden. Insgesamt ist damit aber zu hoffen, dass selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsysteme langfristig einen deutlichen Beitrag zur Verbesserung der Individualmobilität in Städten leisten werden.

Literatur

1. SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems" (16. Jan 2014)
2. Induct Navia Produktbeschreibung, Unternehmenswebseite, <http://induct-technology.com/en/products/navia-the-100-electric-automated-transport> (abgerufen 28. Jun 2014)
3. "Induct presents world's first fully-electric driverless shuttle: the Navia", Induct Pressemitteilung, <http://induct-technology.com/en/files/2012/12/Navia-press-release.pdf> (6. Dez 2012, abgerufen 28. Jun 2014)
4. "Le Cybus d'Inria en démonstration à la Rochelle", INRIA Pressemitteilung, <http://www.inria.fr/content/download/9864/353310/version/1/file/Cybus-Inria.pdf> (12. Mai 2011, abgerufen 28. Jan 2014)
5. Counts, N., "SMART Driverless golf cart provides a glimpse into a future of autonomous vehicles", MIT News, <http://newsoffice.mit.edu/2013/smart-driverless-golf-cart-provides-a-glimpse-into-a-future-of-autonomous-vehicles> (9. Dez 2013, abgerufen 28. Jun 2014)
6. "AKKA link&go 2.0 electric self-driving concept designed for future cities", Designboom, <http://www.designboom.com/technology/akka-linkgo-2-0-electric-driverless-concept-car-for-the-city-of-the-future-03-12-2014/> (12. Mrz 2014, abgerufen 28. Jun 2014)
7. "Induct Launches Navia, The First 100 Percent Electric, Self-Driving Shuttle In The U.S.", Induct Pressemitteilung, <http://www.prnewswire.com/news-releases/induct-launches-navia-the-first-100-percent-electric-self-driving-shuttle-in-the-us-238980311.html> (6. Jan 2014, abgerufen 28. Jun 2014)
8. Zhang, R., Pavone, M., "Control of Robotic Mobility-On-Demand Systems: a Queueing-Theoretical Perspective", Robotics: Science and Systems Conference (2014)
9. "DMV Adopts Autonomous Vehicle Testing Rules", California Department of Motor Vehicles (DMV) Pressemitteilung, http://www.dmv.ca.gov/pubs/newsrel/newsrel14/2014_34.htm (19. Mai 2014, abgerufen 28. Jun 2014)

Es besteht kein Zweifel, dass der Straßenverkehr bezüglich Verkehrs- und Transportleistung der für die Gesellschaft und die Volkswirtschaft bedeutendste Verkehrsträger ist. Der Ausbau der Infrastruktur an den Engpässen des Straßennetzes kann jedoch weder hinsichtlich der nachgefragten Kapazitäten noch bezüglich der erforderlichen Qualitäten mit den Anforderungen an eine verträgliche und umweltgerechte Realisierung Schritt halten. Vor dem Hintergrund begrenzter Budgets für den Aus- und Neubau von Verkehrsinfrastruktur werden lediglich Maßnahmen mit einem überproportionalen volkswirtschaftlichen Nutzen für eine Realisierung in Betracht gezogen. So werden z. B. in der Bundesverkehrswegeplanung Vorhaben erst dann vordringlich weiter verfolgt, wenn deren Nutzen die Kosten um das Dreifache übertreffen.

Neben den knappen Budgets sind die Randbedingungen des Städtebaus und der Raumordnung limitierende Faktoren für einen weiteren Ausbau der Verkehrsinfrastruktur. Für die im Zuge der zu beobachtenden Reurbanisierung steigenden Bevölkerungsdichten in den Städten ist ein proportional verlaufender Ausbau der Flächen für den ruhenden und fließenden Kraftfahrzeugverkehr weder darstellbar noch wünschenswert. Dies gilt in gleicher Weise für das hoch ausgelastete Fernstraßennetz, für das gerade in den Ballungsräumen mit den größten Kapazitätsdefiziten kaum noch Erweiterungsmöglichkeiten bestehen.

Vor diesem Hintergrund bleibt es weiterhin ein vorrangiges gesamtgesellschaftliches Ziel, die Mobilität von Personen und Gütern zu gewährleisten und zu verbessern, indem die Verkehrsleistung durch strukturelle Veränderungen reduziert (vermieden), die Verkehrsnachfrage auf verschiedene Verkehrsträger vernünftig aufgeteilt (verlagert) und die vorhandene Infrastruktur effizient genutzt wird.

Autonomes Fahren bietet neben der Perspektive einer besseren Teilhabe für heute wenig mobile Personengruppen die Aussicht auf eine deutlich verbesserte Nutzungsmöglichkeit der vorhandenen Infrastrukturen. In diesem Zusammenhang besteht zudem die Chance, Stadtraum, der heute dem Kraftfahrzeugverkehr gewidmet ist, für andere Nutzungen zurückzugewinnen.

Die Beiträge im Teil „Verkehr“ setzen sich aus verschiedenen Blickwinkeln mit diesen Perspektiven auseinander, bewerten deren Belastbarkeit und zeigen Möglichkeiten für die Einführung des autonomen Fahrens aus Sicht der Infrastruktur und des Verkehrsmanagements auf. Da die Verkehrssicherheit eine wesentliche Voraussetzung für die Einführung autonomen Fahrens darstellt, werden zudem die Chancen zur Erhöhung der Sicherheit sowie die mit autonomem Fahren verbundenen Sicherheitsrisiken beleuchtet.

Das Kapitel *Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen* von Peter Wagner stellt dar, wie gemischter, aus autonomen und normalen Fahrzeugen zusammengesetzter Verkehr in seiner Interaktion modelliert werden kann. Ziel der Modellierung ist es, auftretende systemische Effekte zu erkennen. Die auf der Grundlage dieser Modellierung durchgeführten Simulationen des motorisierten Straßenverkehrs einer Stadt erlauben eine Potenzialabschätzung für die verkehrlichen Wirkungen autonomen Fahrens im städtischen Kontext.

Im Kapitel *Verkehrliche Wirkungen autonomer Fahrzeuge* von Bernhard Friedrich wird aus der Verkehrsflusstheorie der Einfluss autonomer Fahrzeuge auf die Kapazitäten von freien Strecken im Zuge von Fernstraßen sowie von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen abgeleitet. Auch wenn die Auswirkungen autonomer Fahrzeuge auf die Verbindungsqualitäten von Fahrten, die über unterschiedliche Infrastrukturelemente verlaufen, mit diesen Überlegungen noch nicht umfassend beschrieben werden können, liefern die Betrachtungen eine erste Einschätzung, welche Optimierungspotenziale für die Effizienz des Verkehrsablaufs mit autonomen Fahrzeugen verbunden sein könnten.

Die Metaanalyse *Erkenntnisse aus der Unfallforschung zum Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge* von Thomas Winkle dokumentiert zunächst anhand bestehender Analysen der Unfallforschung Beispiele für das Potenzial durch sicherheitserhöhende Systeme mit geringeren Automatisierungsgraden. Belastbare Untersuchungen zu fahrerlosen Fahrzeugen mit seriennaher Funktionsausprägung fehlen dagegen heute noch. Für Prognosen verbleiben deshalb Abschätzungen des theoretischen Sicherheitspotenzials, die sich u. a. darauf stützen, dass über 90 Prozent der heutigen Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind. Vor diesem Hintergrund verspricht die Vision von flächendeckend fahrerlosen Fahrzeugen im Straßenverkehr einen gesellschaftlich erstrebenswerten Nutzen, selbst wenn die Technik fahrerloser Fahrzeuge keine absolute Perfektion erreichen wird.

Die Einsatzfelder autonomer Fahrzeuge im Bereich des Straßengütertransports werden im Kapitel *Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes* von Heike Flämig skizziert. Ausgehend von einer Logistikkettenbetrachtung werden die sich durch ein autonomes Fahren ergebenden Veränderungen für Unternehmen und Gesellschaft sowie die notwendigen Umsetzungsvoraussetzungen kritisch reflektiert. Im Ergebnis ist damit zu rechnen, dass durch den Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen Chancen für die bessere Nutzung der Infrastruktur und die Optimierung logistischer Prozesse entstehen. Voraussetzung dafür wird aber die Reorganisation der Prozesse in vielen Supply Chains im gesamten logistischen System sein.

Vehicle-on-Demand-Systeme (VoD) sind die weitreichendste Anwendung autonomer Fahrzeuge. Die verkehrlichen Auswirkungen werden im Kapitel *Autonomous Mobility-on-*

Demand Systems for Future Urban Mobility von Marco Pavone beschrieben. Aus den Überlegungen wird deutlich, dass eine Neuorganisation des Stadtverkehrs mit VoD grundsätzlich möglich ist und viele Vorteile mit sich bringt. Durch die gemeinsame Nutzung sind bei VoD deutlich weniger Fahrzeuge für ein gleich gutes Mobilitätsangebot erforderlich. Die einfache Relokalisierung von autonomen Fahrzeugen ermöglicht ein der zeitabhängigen Nachfrage angepasstes Angebot und damit eine Vermeidung von Wartezeiten. Die Modellrechnungen zeigen, dass für ein gleichwertiges Taxiangebot in New York lediglich 70 Prozent der heute im Einsatz befindlichen Fahrzeuge erforderlich wären. Eine weitere Modellrechnung zeigt, dass in einer Stadt wie Singapur für eine vergleichbare Angebotsqualität lediglich ein Drittel der heute im Einsatz befindlichen Fahrzeuge benötigt werden würde.

Auch wenn verschiedene Fragestellungen zu den verkehrlichen Aspekten des autonomen Fahrens gerade im Hinblick auf den Mischverkehr mit normalen Fahrzeugen und insbesondere mit Fußgängern und Radfahrern noch nicht ausreichend beantwortet werden können, erwarten die einzelnen Beiträge eine wesentlich verbesserte Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur und eine Stabilisierung des Verkehrsablaufs. Damit verbunden sind vielfältige Chancen zur Verbesserung der Mobilität von Personen und Gütern und damit einhergehend eine Reduktion der Umweltbelastungen sowie die Rückgewinnung von öffentlichem Raum für urbanes Leben. Wesentlich für die erfolgreiche Einführung autonomer Fahrzeuge wird die Konzeption belastbarer Migrationspfade für die Entwicklung des Verkehrssystems unter Berücksichtigung der Infrastruktur sein. In diesen Pfaden muss die zunehmende Automatisierung wie auch die zunehmende Durchdringung des Gesamtsystems flexibel abgebildet werden können. Entsprechende Konzepte werden geprägt sein von der Widmung von Flächen für autonomen, normalen und gemischten Verkehr und von spezifischen Regeln für die Geschwindigkeit, um in allen Fällen eine hohe Verkehrssicherheit zu gewährleisten.

Peter Wagner

Inhaltsverzeichnis

15.1 Einleitung 314

15.2 Ein Modell des Fahrens 315

15.3 Mensch versus Maschine 319

15.4 Anfahren an einer Lichtsignalanlage (LSA) 322

15.5 Adaptive Lichtsignalanlage 324

15.6 Grüne Welle mit autonomen Fahrzeugen 325

15.7 Simulation einer Stadt 326

15.8 Fazit 328

Literatur 329

P. Wagner (✉)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik,
Deutschland
Peter.wagner@dlr.de

15.1 Einleitung

Dieser Beitrag hat zum Ziel, die Auswirkungen des autonomen Fahrens auf der Ebene des Verkehrsmanagements zu quantifizieren. Dazu wird eine Modellierung des autonomen Fahrens entwickelt, die es ermöglicht, von Menschen geführte und autonome Fahrzeuge mit nur geringen Modifikationen zu verwenden. Das ist wichtig, wenn es darum geht, wie die Instrumente des Verkehrsmanagements weiterzuentwickeln sind, um autonome Fahrzeuge im Verkehrssystem berücksichtigen zu können. Interessant ist in diesem Zusammenhang vor allem der sogenannte gemischte Verkehr, bei dem normale und autonom fahrende Fahrzeuge miteinander agieren. Das dürfte – auch nach der Markteinführung autonomer Fahrzeuge – noch lange der Normalzustand auf den Straßen sein; von daher ist es von großer praktischer Bedeutung, genau diesen Zustand gut zu verstehen, um eventuell auftretende systemische Effekte im Voraus zu erkennen und diesen entgegenwirken zu können.

Da es bislang autonome Fahrzeuge noch nicht gibt, sind Teile der folgenden Betrachtungen und Szenarien sicher spekulativ. Allerdings ist auch die Modellierung des humanen Fahrers noch bei Weitem nicht abgeschlossen, sodass in diesem Beitrag der Schwerpunkt auf einer konsistenten Modellierung liegen wird. Zielrichtung der hier vorgestellten Modellierung ist es, von Menschen geführte und autonome Fahrzeuge möglichst mit dem gleichen Modell zu beschreiben, bei dem sich nur die Parametrierungen unterscheiden. Ein gutes Beispiel dafür ist der einzuhaltende Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, ausgedrückt durch die Zeitlücke: Ein autonomes Fahrzeug kann hier Werte von 0,3...0,5 s [1] erreichen, von Menschen geführte Fahrzeuge dürfen nach dem Gesetz 0,9 s nicht unterschreiten (in Deutschland). Die entsprechende gesetzliche Empfehlung liegt sogar bei 2,0 s, ein Wert, der aber nur in Zeiten schwacher Verkehrsnachfrage eingehalten wird. Im dichten Verkehr wird dieser Wert zum Teil deutlich unterschritten, als häufigster Wert auf einer dicht befahrenen Autobahn werden 1,1 s erreicht (s. Abb. 15.3), bei einem Durchschnittswert von 1,4 s. Würden die Fahrer sich an die gesetzlichen Vorgaben halten, dann würde der Verkehr auf vielen Straßen sehr viel früher zum Erliegen kommen als derzeit.

Dieser Beitrag ergänzt Kap. 16 und Kap. 19 in diesem Buch. Während Kap. 16 ganz allgemein die verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge beschreibt, geht es in diesem Beitrag neben der Modellierung dieser und von Menschen gefahrener Fahrzeuge um Effekte autonomer Fahrzeuge auf das Verkehrsmanagement. Kapitel 19 hingegen ignoriert Fragen des Verkehrsablaufes und der Verkehrssteuerung weitgehend und betrachtet vor allem eine optimale Allokation von Angebot zur Nachfrage unter der Voraussetzung, dass Fahrzeuge geteilt werden können. Ganz richtig kann man an dieser Stelle festhalten, dass eine Kombination dieser Ansätze, zusammen mit einer korrekten Beschreibung des Anteils von Reisenden, die sich von einem robotischen *Mobility-on-demand*-System transportieren lassen, die bestmögliche Abschätzung des Potenzials autonomer Fahrzeuge ermöglichen würde.

Ebenfalls nicht betrachtet werden hier Effekte, die aus einer grundlegend anderen Organisation des Verkehrs resultieren. Beispielhaft sei hier nur das EU-Projekt CityMobil genannt, in dem solche Szenarien diskutiert und näher untersucht wurden [2].

In diesem Beitrag wird an einigen wenigen Beispielen, die nicht vollständig spezifiziert sind, der Frage nachgegangen, wie sich autonome Fahrzeuge auf typische Verkehrsmanagementanwendungen auswirken. Das sind, nach aufsteigender Komplexität geordnet, die Simulation einer einzelnen Lichtsignalanlage (Abschn. 15.4), die Simulation einer Kreuzung, die von einer adaptiven Lichtsignalanlage gesteuert wird (Abschn. 15.5), die Simulation einer grünen Welle (Abschn. 15.6) und die Simulation einer ganzen Stadt (Abschn. 15.7).

Ein Teil der hier zu betrachtenden Fragestellungen kann auf Ergebnisse zurückgreifen, die das Einführen einer intelligenten Abstandsregelung (autonomous intelligent speed control – AIC) auf den Verkehrsablauf vor allem auf Autobahnen hat [3]. Zu diesem Bereich gibt es umfangreiche Literatur, die Dissertation von Kersting [3] und Teile des Buches von Winner et al. [12] geben hier mehr Überblick als in diesem Kapitel möglich ist.

Ein solches AIC-Szenario hat starke Ähnlichkeit zu Use-Case 1 „Interstate Pilot with Availability through Driver“, und das ist wiederum (aus Sicht des Verkehrsablaufes) ein Spezialfall von Use-Case 3 „Full Automation with Availability through Driver“ (s. Kap. 2 für die Definition der Use-Cases). Das ist auch der Use-Case, der in diesem Kapitel die wichtigste Rolle spielt – wobei es aus Sicht des Verkehrsflusses ziemlich gleichgültig ist, ob der Fahrer verfügbar ist oder nicht. Die Verfügbarkeit des Fahrers könnte wichtig sein, wenn der Einfluss von Ausfällen auf den Verkehrsfluss untersucht wird, dieses Thema wird allerdings in diesem Buch nicht aufgegriffen. Es würde eine detaillierte Statistik voraussetzen, wie häufig so etwas passiert und unter welchen Randbedingungen – eine Information, die beim derzeitigen Stand der Technik autonomer Fahrzeuge nicht verfügbar ist. Die Use-Cases 2 (Valet-Parken) und 4 (Vehicle-on-Demand) spielen in diesem Abschnitt eine untergeordnete Rolle, der Use-Case 4 ist aus Verkehrsflusssicht allerdings wie Use-Case 3 zu behandeln. Use-Case 2 wäre interessant, weil er Einfluss hat auf den sogenannten Parksuchverkehr und damit indirekt auf die Verkehrsnachfrage und somit auch die Verkehrssteuerung beeinflusst, würde aber auf der Ebene des Verkehrsmanagements eine deutlich kompliziertere Vorgehensweise voraussetzen als hier geleistet werden kann – so bräuchte es eine präzise Quantifizierung des Parksuchverkehrs in einer Stadt. Auch die in Abschn. 15.7 beschriebene Simulation der Stadt Braunschweig geht davon aus, dass Fahrzeuge, die ihr Ziel erreicht haben, immer und sofort einen Parkplatz finden.

15.2 Ein Modell des Fahrens

Modelle, die beschreiben, wie ein Mensch ein Fahrzeug führt, gibt es schon sehr lange [4]. Sehr viele dieser Modelle (für einen Überblick s. [5], [6], [7], [8]) – seit 1950 sind wohl mehr als 100 Modelle allein für den Prozess des Folgens eines vorausfahrenden Fahrzeuges beschrieben worden – lassen sich ohne Weiteres auch als Modelle für ein autonomes Fahrzeug verstehen – wie bereits in Abschn. 15.1 begründet, mit verschiedenen Parametrierungen für Mensch bzw. Maschine. Damit wird es konzeptionell recht einfach, auch gemischten Verkehr zu modellieren und die Auswirkungen auf das gesamte Verkehrssystem zu quantifizieren.

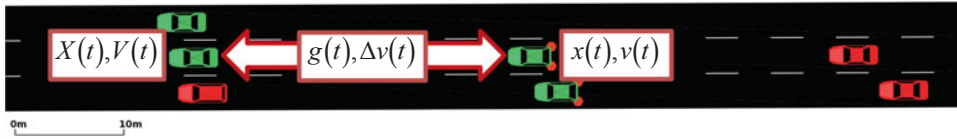


Abb. 15.1 Visualisierung der verwendeten dynamischen Größen anhand eines SUMO [17]-Screenshots. Fahrtrichtung ist von rechts nach links

Im Folgenden liegt der Fokus auf dem Prozess des Fahrzeugfolgens, welches den wichtigsten, aber nicht den einzigen relevanten Prozess darstellt, der darüber bestimmt, wie sich der Verkehrsablauf auf Straßen entwickelt.

Jedes Fahrzeug wird dabei beschrieben durch seine Position $x(t)$, die von der Zeit t abhängt und in Bezug auf eine Referenz (z. B. Anfang des aktuellen Straßenabschnitts) definiert ist, durch seine Geschwindigkeit $v(t)$ und seine Beschleunigung $a(t)$ (s. Abb. 15.1). Bei Mehrspurverkehr kommt noch die Spur hinzu, auf der das Fahrzeug sich befindet, oder die sogenannte Lateralkoordinate, also der Abstand des Fahrzeugs vom Fahrbahnrand. Genau genommen müsste auch noch eine Indizierung jedes Fahrzeugs eingeführt werden, was im Folgenden durch die Beschreibung des vorausfahrenden Fahrzeugs mit großen Buchstaben $X(t), V(t), A(t)$ umgangen wird. Mit den zusätzlichen Variablen Abstand $g(t) = X(t) - x(t) - \ell$ und Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v(t)$ (s. Abb. 15.1) kann dann die Reaktion des Folgefahrzeugs definiert werden als die Beschleunigung, die das Fahrzeug in einer gegebenen Situation appliziert:

$$a = \frac{d}{dt}v = \dot{v} = f(v, g, \Delta v) \quad (15.1)$$

Diese abstrakte Gleichung (15.1) ließe sich noch weiter abstrahieren, z. B. fehlt hier ein Modell für Fahrerfehler und für Fluktuationen ebenso wie die Modellierung einer Reaktionszeit. Ein entsprechendes Fehlermodell wird im Abschn. 15.3 vorgestellt, die Reaktionszeit bleibt ganz außen vor, weil sie ein enorm schwieriges Konstrukt ist: In Messdaten zeigt sich zwar sehr oft, dass die Beschleunigung eines Folgefahrzeugs rund zwei Sekunden der Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs hinterherhinkt, es gibt aber auch Fälle, in denen das Folgefahrzeug rund eine Sekunde vor dem Führungsfahrzeug zu bremsen beginnt – z. B. bei der Annäherung an eine Lichtsignalanlage (Ampel). Im Folgenden soll die abstrakte Gleichung (15.1) genauer spezifiziert werden. Beispielsweise ist es eine wichtige Frage für die folgenden Betrachtungen, wie genau ein autonomes Fahrzeug sich bewegt. Überraschenderweise funktionieren viele der aktuellen adaptiven Abstandsregler und auch veröffentlichte Steuerungsalgorithmen für automatische Fahrzeuge [9], [10], [11] als linearer Regler:

$$\dot{v} = \alpha(g - g^*(v)) + \beta\Delta v \quad (15.2)$$

Typische Parameter für die beiden Zeitkonstanten sind dabei durch $\alpha = 1/20 \text{ 1/s}^2$ und $\beta = 1/1,5 \text{ 1/s}$ gegeben; bei diesen Werten sind solche Regler so eingestellt, dass sie von Fahrern als angenehm und natürlich empfunden werden [12]. Für den bevorzugten Abstand $g^*(v) = v\tau$ wird im Wesentlichen die gesetzliche Regel übernommen, wenn auch mit einem etwas kleineren Wert der bevorzugten Zeitlücke τ , z.B. $\tau = 1,5 \text{ s}$, der auch im Folgenden verwendet wird. Das Modell in Gleichung (15.2) wurde ursprünglich von Helly 1959 [13] als ein Modell eingeführt, das einen menschlichen Fahrer beschreiben soll. Das unterstreicht die Behauptung, dass viele Fahrermodelle und die Modelle für das autonome Fahren mathematisch sehr ähnlich sind. Worin sie sich unterscheiden, wird versucht in Abschn. 15.3 zu spezifizieren.

Das Modell in Gleichung (15.2) hat Grenzen. Beispielsweise ist es nur für bestimmte Parameter (α, β) sicher und auch nur für eine kleine Auswahl von Parametern kolonnenstabil. Unter Kolonnenstabilität wird verstanden, dass auch eine Kette von mehreren Fahrzeugen, die hintereinander herfahren, nicht anfängt sich aufzuschaukeln: Aus kleinen Störungen, z.B. ein schwaches Bremsen des ersten Fahrzeugs wird entlang der Kette ein immer stärkeres, das im Extremfall bis zum Stillstand eines der Fahrzeuge in der Kette führen kann. Oder auch zu einem Verkehrsunfall. Dieses Verhalten ist bislang nur in sehr speziellen Situationen gefunden worden (s. z.B. [19]), es scheint nicht der Normalfall zu sein.

Allerdings werden die Parameter mit Kolonnenstabilität von menschlichen Fahrern als nicht sehr angenehm empfunden, weshalb AIC-Regler hier meistens einen Kompromiss eingehen, der zu einer schwachen Kolonneninstabilität führt [12].

Daher wird hier ein anderer Ansatz betrachtet, der in der Tradition der Modelle in [14], [15], [16] steht. In einem ersten Schritt wird überlegt, dass eine wichtige Bedingung für sicheres Fahren erfüllt ist, wenn Folgendes gilt:

$$d(v) + v\tau \leq D(V) + g.$$

In dieser Gleichung sind $D(V), d(v)$ die Bremswege des führenden und des folgenden Fahrzeugs. Offensichtlich setzt dieses Modell voraus, dass der Folgefahrer eine Vorstellung davon hat, ob und wie das Führungsfahrzeug fahren bzw. bremsen wird. Das ist sicherlich nicht vollständig korrekt, dennoch funktioniert Fahren in vielen Fällen unter der Annahme, dass die anderen Fahrer sich so ähnlich verhalten wie man selbst.

Allerdings bedeutet das auch, dass sich der aus dieser und der folgenden Gleichung resultierende Ansatz durch ein „merkwürdiges“ Verhalten des Führungsfahrzeugs austricksen lässt. Verfügt das Führungsfahrzeug z.B. über ein Notbremsystem, das Verzögerungen bis zu 12 m/s^2 erlaubt, dann verletzt es die Annahme, dass es sich so ähnlich verhält wie das Folgefahrzeug – typische Verzögerungswerte menschlicher Fahrer liegen im Bereich bis maximal 4 m/s^2 –, und weist damit einen viel kürzeren Bremsweg auf. Ein wenig lässt sich das noch ausgleichen, wie auch die folgenden Simulationsergebnisse zeigen, weil die aus diesem Ansatz resultierenden Gleichungen bei starkem Bremsen des Führungsfahrzeugs im Extremfall ihre eigene Bremsverzögerung überschreiten können. Andererseits ist

dieser Ansatz auch einer, den man für die Entwicklung von Fahrermodellen für die Verkehrssicherheit weiter treiben könnte.

Das obige Modell lässt sich weiterentwickeln, indem verlangt wird, dass die Sicherheitsbedingung nicht nur zur aktuellen Zeit t erfüllt sein soll, sondern auch noch eine gewisse Zeit $t + T$ in der Zukunft. Die Zeit T ist dabei die Antizipationszeit, also die Länge des Planungshorizonts des Fahrers. Bezeichnet die Notation x den Wert der Variablen x zur Zeit $t + T$, wird aus der Sicherheitsgleichung:

$$d(v') + v'\tau \leq D(V') + g'.$$

Diese Gleichung kann aber nun nach der Beschleunigung a umgestellt werden. So ist $x' = x + vT + aT^2 / 2$, und zusammen mit einem Ansatz für die Bremswege $d(v) = v^2 / (2b)$ lässt sich dann die Sicherheitsgleichung nach a auflösen. Dafür gibt es verschiedene Ansätze, hier wird vor allem der exakte Ansatz verfolgt:

$$\dot{v} = \frac{1}{T} \left(-b(\tau + T/2) + \sqrt{b^2(\tau + T)^2 + V^2 + 2bvT + 2b(g + \Delta vT) - v} \right). \quad (15.3)$$

Interessanterweise führt dieser Ansatz für $T \rightarrow 0$ auf den in SUMO [17] verwendeten zurück.

Eine andere Möglichkeit, [15] folgend, ist eine Taylor-Entwicklung von $d(v') = d(v + aT) \approx d(v) + aTv / b(v)$, was interessanterweise auf eine lineare Gleichung für a führt, die einfacher zu lösen und numerisch weniger komplex ist:

$$a = \frac{V^2 - v^2 + 2b(T\Delta v + g - v\tau)}{T(2b\tau + bT + 2v)}.$$

Obwohl diese Gleichungen kompliziert aussehen und es einigermaßen unwahrscheinlich ist, dass Menschen tatsächlich eine Wurzel aus einem komplizierten Ausdruck ziehen können, sieht sie grafisch dem Helly-Modell doch sehr ähnlich. Das ist deshalb interessant, weil es sich in der Tat gut vorstellen lässt, dass ein menschlicher Fahrer in der Lage ist, eine lineare Abwägung etwa nach dem Motto „Ich bin etwas schneller als der vor mir, aber der Abstand ist groß, daher muss ich gegenwärtig nichts ändern“ durchführt. Eine Vorstellung, wie diese Beschleunigungsfunktion für realistisch gewählte Parameter aussieht, vermittelt Abb. 15.2.

In diesem Zusammenhang ist es noch interessant zu wissen, ob dieser Ansatz tatsächlich zusammenstoßfrei ist. Die simple Antwort lautet: nein. Unter bestimmten Bedingungen lässt sich die Dynamik, die aus Gleichung (15.3) folgt, in der Tat austricksen. Das sei an einer Kette von Fahrzeugen demonstriert, die einem Führungsfahrzeug folgen, das nach einem bestimmten Protokoll $a_0(t)$ fährt. Dabei lassen sich als wesentliche Parameter in der Dynamik des Führungsfahrzeugs vor allem die maximalen Beschleunigungen parametrieren. Von besonderem Interesse sind dabei die maximalen Bremsverzögerungen und die Frage, ob man bei dem Modell einen Zusammenstoß produzieren kann.

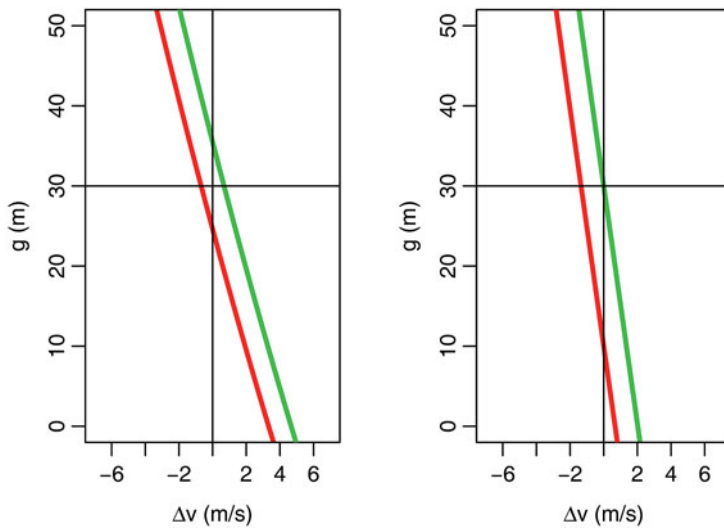


Abb. 15.2 Darstellung der Beschleunigungsfunktionen. Statt hier die gesamte Funktion zu zeichnen, wird nur der durch zwei Linien begrenzte Bereich im $(\Delta v, g)$ -Raum dargestellt, in dem die Beschleunigung beider Modelle klein ist. Links von den Linien bremst das Fahrzeug, rechts davon beschleunigt es. Die linke Abbildung ist das Modell von Gleichung (15.3), die rechte das Helly-Modell (15.2). Die gewählten Parameter sind $V = 20$, $\tau = 1,5$, $b = 4$, $T = 2$

Natürlich kann kein Verfahren wirklich alle Möglichkeiten durchtesten. Das folgende Vorgehen ermöglicht aber zumindest eine Abschätzung, wie sicher die Modelle sind. Dazu folgen in einer Simulation $n = 50$ Fahrzeuge einem Führungsfahrzeug, das nach einem bestimmten Protokoll seine Beschleunigung wählt. Unter anderem verzögert es immer wieder bis zum Stillstand, zum Teil auch mit Bremsverzögerungen, die an der Grenze der derzeitigen fahrdynamischen Möglichkeiten sind. Aus Untersuchungen zu diesem Thema ergab sich sehr schnell, dass die Modelle nur dann ohne Unfall auskommen, wenn die Antizipationszeit T beim Bremsen auf einen kleineren Wert gesetzt wird. Im Folgenden werden die Modelle immer mit $T = 2$ s beim normalen Fahren und mit $T = 0,5$ s beim Bremsen betrieben.

Aus den entsprechenden Simulationen geht dann hervor, dass unter diesen Randbedingungen keine Unfälle mit dem Modell in Gleichung (15.3) auftreten, jedenfalls nicht mit dem gewählten Protokoll $a_0(t)$. Das Helly-Modell ist allerdings mit den gewählten Parametern nicht so tolerant und produziert gelegentlich Auffahrunfälle.

15.3 Mensch versus Maschine

An diesem Punkt stellt sich die Frage, was denn eigentlich einen menschlichen Fahrer von einem autonomen Fahrzeug unterscheidet. Bislang ist nur ein wesentlicher Unterschied zu

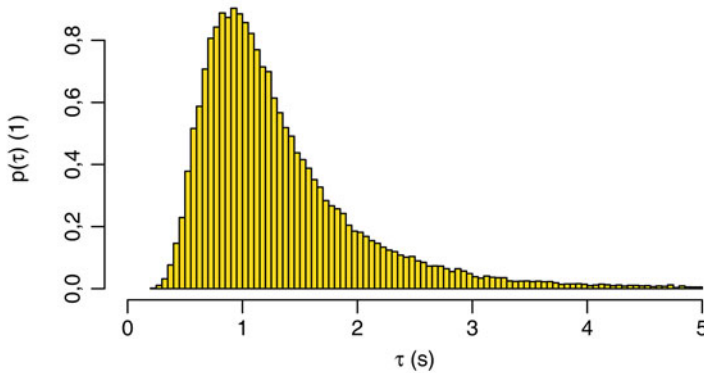


Abb. 15.3 Abstandsverteilung auf der linken Spur der A3. Dargestellt ist die Dichte der jeweiligen Zeitlücke. Ziemlich genau bei 1,1 s liegt das Maximum der Funktion, während der Mittelwert bei 1,4 s liegt. Es werden zum Teil gefährlich kurze Zeitlücken beobachtet

erkennen, und das ist die Zeitlücke τ , mit der die beiden fahren. Menschen sollten nicht mit weniger als $\tau = 0,9$ s Abstand fahren, die gesetzliche Empfehlung ist sogar $\tau = 2$ s, eine Maschine kann im Prinzip mit $\tau = 0,3 \dots 0,5$ s Abstand fahren [1]. Eine beispielhafte Auswertung der tatsächlich gefahrenen Abstände (s. Abb. 15.3) auf einer deutschen Autobahn zeigt (im Bereich um 100 km/h, wo die größten Verkehrsstärken erreicht werden), dass einige (wenige) menschliche Fahrer diesem „Ideal“ nahe kommen, die überwältigende Mehrheit zeigt aber ein gesetzkonformes Verhalten.

Abb. 15.3 demonstriert auch, dass das menschliche Verhalten eine beträchtliche Bandbreite aufweist [18], was im Gegensatz zu autonomen Fahrzeugen steht: Diese würden alle mit einem kleinen und sehr ähnlichem Wert von τ fahren. Diese Bandbreite lässt sich detaillierter charakterisieren [17] und quantifizieren. Im Wesentlichen kann gesagt werden, dass τ nicht nur zwischen verschiedenen Fahrern unterschiedlich ist, sondern sogar bei ein und demselben Fahrer nicht konstant bleibt. Leider ist τ nicht präzise beobachtbar, vor allem dann nicht, wenn das Führungsfahrzeug selbst die Geschwindigkeit permanent verändert, von daher können an dieser Stelle nur Vermutungen angestellt werden, wie sich τ im Zeitverlauf verändert. Das führt dann auf sogenannte 2-D-Modelle [17], [19], bei denen τ in jedem Zeitschritt variiert. Eine einfache Vorstellung, die auf eine solche Dynamik führt, ist, dass der Fahrer bei der Bestimmung des Abstandes einen Fehler macht. Allerdings ist dieser Fehler zeitlich korreliert, d. h. wenn zu einem Zeitpunkt der geschätzte Abstand kleiner ist als der wahre Abstand, so wird das auch noch eine gewisse Zeit danach der Fall sein. Und, mit einiger Wahrscheinlichkeit, ist der Fehler asymmetrisch: Abstände werden oft deutlich kürzer abgeschätzt als sie tatsächlich sind. Jedenfalls führt ein solcher Modellierungsansatz auf eine sehr breite Verteilung von τ -Werten, genau wie empirisch beobachtet.

Ein zweiter Punkt, der einen Mensch von einer Maschine unterscheidet, ist der sogenannte Aktionspunktmechanismus [20]. Genau genommen lässt sich ein menschlicher

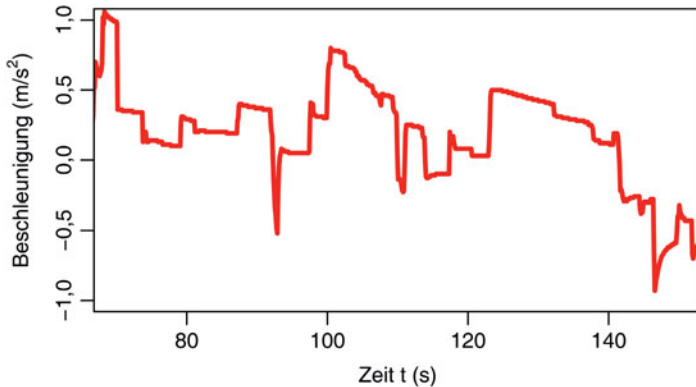


Abb. 15.4 Beschleunigung als Funktion der Zeit bei einem menschlichen Fahrer. Es ist zu sehen, dass sich die Beschleunigung an den sogenannten Aktionspunkten sprunghaft ändert. Zwischen den Aktionspunkten bleibt sie näherungsweise konstant. Die Daten sind bei einer „Fahrt“ des Autors mit einem Fahrsimulator aufgenommen worden, ähnliche Bilder finden sich in allen Datensätzen mit einer ausreichend guten Messung der Beschleunigung oder der Stellung von Gas- und Bremspedal

Fahrer nicht durch eine Differenzialgleichung (15.1) beschreiben. Vielmehr erfolgt die Kontrolle eines Fahrzeugs durch Korrektur der Beschleunigung (Gaspedalstellung) in unregelmäßigen Zeitabständen, ein Beispiel dafür zeigt Abb. 15.4.

Die zeitlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Aktionspunkten folgen ebenfalls einer sehr breiten Verteilung mit Werten zwischen 0,5 und 1,5 s. Offensichtlich ist hier ein weiterer Modellierungsansatz für Verkehrssicherheitsfragen – wenn die Zeit zwischen zwei Aktionspunkten sehr lang wird, dann kann es zu einer kritischen Situation kommen. Im Normalfall passiert das aber nicht, und dann gibt es nur geringe Unterschiede zwischen einer Modellierung nach Gleichung (15.1) und einer Modellierung, in der die Aktionspunkte explizit verwendet werden [21]. Insbesondere führt der Aktionspunktmechanismus allein nicht zu einer breiten Verteilung von Abständen zwischen den Fahrzeugen.

Auch dieses sei wieder am Beispiel der in Abschn. 15.2 benutzten Kette von Fahrzeugen demonstriert, die einem Führungsfahrzeug folgen. Eine Auswertung des (in der Simulation) gemessenen Abstandes, hier als Funktion der Nummer des Folgefahrzeuges, zeigt, dass ein autonomes Fahrzeug in den meisten Fällen mit deutlich geringerer Varianz dem Führungsfahrzeug folgt – trotz dessen zum Teil sehr volatilen Verhaltens. Eine Darstellung dazu findet sich in Abb. 15.5.

Somit sind die in diesem Kapitel verwendeten Modelle spezifiziert, und der Unterschied zwischen der menschlichen und der autonomen Fahrweise ist charakterisiert. Im Folgenden wird anhand einiger Anwendungen demonstriert, was das für typische Verkehrsmanagementanwendungen bedeutet.

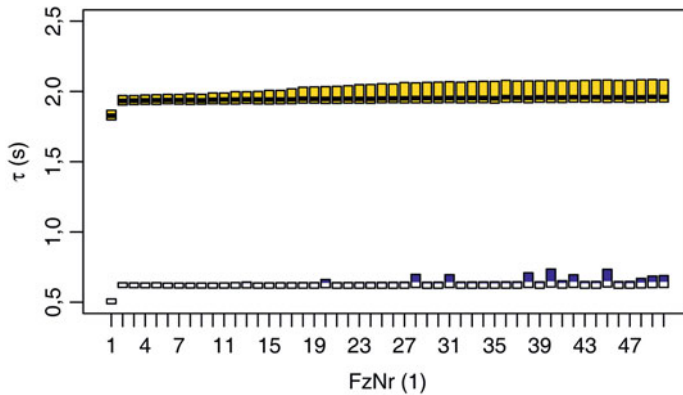


Abb. 15.5 Abstandsverhalten für menschliche und autonome Fahrzeuge. Dargestellt ist der Median des Abstands und die 25 Prozent- und 75 Prozent-Perzentile, jeweils als Funktion der Position in der Kette. Die obere Kurve zeigt das Modell des menschlichen Fahrers, die untere modelliert eine Kette von autonomen Fahrzeugen

15.4 Anfahren an einer Lichtsignalanlage (LSA)

Dieser Prozess ist eine der Situationen, bei dem autonome Fahrzeuge erhebliche Gewinne versprechen. An einem Zufluss einer LSA wird im Folgenden die Verlustzeit pro Fahrzeug für eine beliebige Kombination aus normalen und autonomen Fahrzeugen untersucht. Dabei bezeichnet η den Anteil autonom fahrender Fahrzeuge, mit der Annahme $\tau = 0,5$ s für autonome und $\tau = 1,5$ s für normale Fahrzeuge. Die Simulationsergebnisse werden darüber hinaus durch eine theoretische Betrachtung gestützt. Für die beschriebene Situation gibt es eine solche Theorie, die in [22] entwickelt wurde. Interessanterweise lässt sie sich auf eine Situation mit einem Mix aus autonomen und normalen Fahrzeugen übertragen. Dann lautet der entsprechende Ausdruck:

$$d(q, \eta) = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-y)} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{q(1-x)}, \quad \lambda = \frac{g}{c}, y = \frac{q}{s}, x = \frac{y}{\lambda}, s = s_0(1-\eta) + s_1\eta \quad (15.4)$$

In Gleichung (15.4) ist q die Nachfrage, s_0 die Kapazität eines Stroms von Menschen gesteuerter Fahrzeuge, s_1 die Kapazität eines Stroms automatisierter Fahrzeuge, g die Freigabezeit (Grünzeit) und c die Umlaufzeit der Anlage. Die Umlaufzeit ist die Zeit, die vergeht, bis die Anlage wieder den Anfangszustand erreicht hat. Die Simulationsergebnisse für ausgewählte Variationen der Nachfrage q und des Anteils autonomer Fahrzeuge η ist in Abb. 15.6 dargestellt.

Die Kurven in Abb. 15.6 wurden aufgenommen, indem verschiedene Werte der Nachfrage q (variierend von 18 Fz/h bis 1800 Fz/h) für jeweils 5 Stunden simuliert wurden. Die Nachfrage selbst ist eine stochastische Größe (näherungsweise Poisson-verteilt), d. h., in jedem betrachteten Zeitintervall kommt immer eine andere Anzahl von Fahrzeugen an,

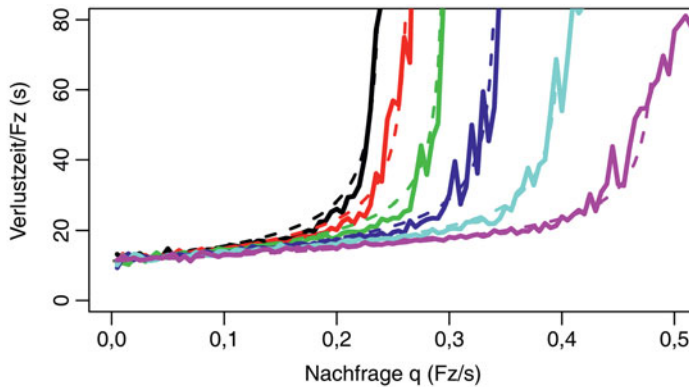


Abb. 15.6 Verlustzeit an einer LSA als Funktion der Nachfrage und für verschiedene Ausstattungsraten $\eta = 0, 20\%, 40\%, 60\%, 80\%$ und 100% (von links nach rechts). Die gestrichelten Linien sind aus Gleichung (15.4) berechnet, allerdings mit einer Kapazität s , die direkt in der Simulation gemessen wurde

nur der Mittelwert über viele solcher Zeitintervalle ergibt dann die korrekte (gesetzte) Nachfrage.

Für jedes simulierte Fahrzeug wurde die Verlustzeit aufgezeichnet und aus diesen Verlustzeiten der in Abb. 15.6 eingetragene Mittelwert ausgerechnet. Im Prinzip kann die ganze Verteilung der Verlustzeiten zur Charakterisierung der Ergebnisse herangezogen werden, was aus Platzgründen unterbleibt, obwohl es interessant wäre: Die Schwankungen der Verlustzeiten sind ein Maß für die Verlässlichkeit eines solchen Systems. Allerdings erweist sich in dem betrachteten Beispiel, dass die Schwankungen der Verlustzeit nur sehr schwach vom Anteil der autonom fahrenden Fahrzeuge abhängt, die wesentliche Quelle von Stochastizität in diesem System wird von der Nachfrage generiert und nicht von der Dynamik der Fahrzeuge.

Zwei Ergebnisse fallen in Abb. 15.6 auf. Zum einen stimmt die Beschreibung durch die Theorie nicht immer mit den Simulationsergebnissen überein. Hier steckt noch einiges an Forschungsbedarf, weil es gar nicht so einfach ist, die in der Theorie vorausgesetzten Annahmen in die simulative Realität zu übertragen. Das wird sicherlich beim Vergleich mit realen Messwerten noch einmal schwieriger. Für die erzielte Übereinstimmung mussten darüber hinaus aus der Simulation ermittelte Werte für die Sättigungsverkehrsstärke verwendet werden – mit den theoretischen Werten, also den τ -Werten wie in Abschn. 15.3 definiert, ist die Übereinstimmung nicht überzeugend.

Zum anderen verändert sich durch die autonomen Fahrzeuge „nur“ die Kapazität, ansonsten gibt es keine weiteren oder nur sehr geringe Gewinne. Solange die Nachfrage von der jeweiligen Kapazität entfernt ist, gibt es auch nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien, zumindest nicht auf der Ebene der hier gewählten Beschreibung.

Eine Änderung der Kapazität hat allerdings einen sehr positiven Effekt: Es bedeutet, dass die notwendigen Freigabezeiten an einer LSA kürzer werden können und damit mehr Zeit für andere Verkehrsträger zur Verfügung steht.

15.5 Adaptive Lichtsignalanlage

In Abschn. 15.4 wurde eine Lichtsignalanlage betrachtet, die in Festzeitsteuerung läuft. Viele moderne Anlagen laufen allerdings mit einer adaptiven Steuerung. Das bedeutet, dass die LSA versucht, ihre Freigabezeiten nach der aktuellen Nachfrage einzurichten. Bei kleiner Nachfrage resultieren daraus kurze Freigabezeiten, bei großer Nachfrage reagiert die Anlage mit langen Freigabezeiten. Die Details sind etwas komplizierter, weil die Verlustzeit als Funktion der Nachfrage betrachtet ein Minimum bei einer bestimmten optimalen Umlaufzeit hat. Eine adaptive Anlage ist in der Lage, sich die optimale Umlaufzeit selbst auszusuchen, darüber hinaus nutzt sie auf sehr geschickte Weise die Schwankungen aus, die in einem Verkehrsstrom vorkommen.

Auch in diesem Fall soll untersucht werden, wie eine solche adaptive Anlage mit einem Gemisch aus autonomen und normalen Fahrzeugen umgeht. Zu diesem Zweck wurde die Simulation einer zweiarmligen Kreuzung aufgesetzt, die mit einem adaptiven Verfahren gesteuert wird [25]. Die beiden Arme sind 600 m lang, gemessen wird wieder die Verlustzeit pro Fahrzeug an dieser Kreuzung. Im Unterschied zu Abschn. 15.4 wurde jetzt aber eine Nachfrage gewählt, die von der Zeit abhängt und damit eine typische Spitzenstundengruppe nachbildet, bei der zur Zeit des Nachfragemaximums die Anlage trotz ihrer Adaptivität gesättigt ist. Die hier gewählte Nachfragefunktion lautet:

$$q(t) = q_0 + q_1 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right),$$

wobei q_0 eine Grundlast ist, q_1 die Amplitude der Nachfrageschwankung und T die gesamte Zeitdauer der Simulation. Beide Arme werden mit der gleichen Nachfrage belastet, was einen relativ ungünstigen Fall darstellt.

Neben den Verlustzeiten sind in diesem Fall vor allem die Freigabezeiten von Interesse. Da die Anlage diese Zeiten der Nachfrage anpasst, schwanken diese innerhalb typischer Grenzen. In vielen Ländern kann die Freigabezeit nicht beliebig schwanken: So kann die Freigabezeit bei einer normalen Lichtsignalanlage nicht unter 5 s sinken, und in den folgenden Simulationen ist die maximale Freigabezeit auf 40 s gesetzt.

Eine solche Simulation ist auch ein interessanter Fall bei der Auswertung der Simulationsdaten. Eine einzelne Simulation einer solchen Spitzenstunde weist starke Schwankungen sowohl bei den Verlustzeiten als auch bei den Freigabe- und Umlaufzeiten auf. Zwar wurden die Verlustzeiten jeweils über einen Umlauf der Anlage gemittelt, das reicht aber nicht, weil diese Umläufe selbst eine stochastische Größe sind, deren Mittelwert und Statistik sich erst aus genügend häufigen Wiederholungen desselben Szenarios, aber mit leicht verschiedenen Details ergibt – ganz so wie in der Realität, wenn aufeinanderfolgende Tage betrachtet werden. Um zu statistisch validen Ergebnissen zu kommen, wurde in diesem Fall die Spitzenstunde 50-mal wiederholt. Jeweils in Fünf-Minuten-Intervallen wurden die Mittelwerte der Verlustzeiten über den letzten Umlauf und die dazu gehörende, von der Anlage eingestellte Freigabezeit gesammelt. Aus diesen Daten setzen sich dann die Ergebnisse in Abb. 15.7 zusammen.

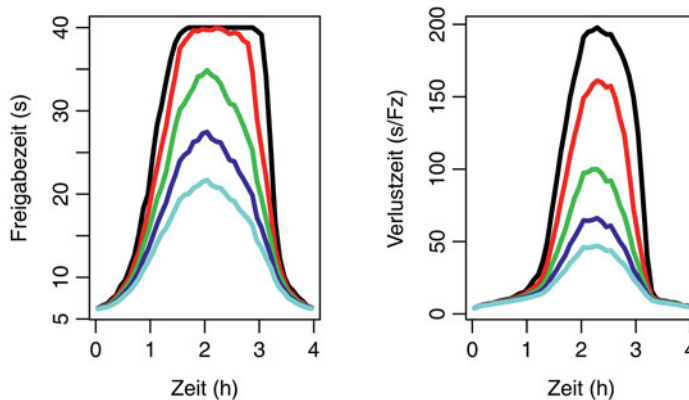


Abb. 15.7 Freigabezeiten (links) und Verlustzeiten (rechts) an einer simulierten adaptiven Anlage, dargestellt als Funktion der Zeit und für verschiedene Anteile autonomer Fahrzeuge, $\eta = 0\%$, 25% , 50% , 75% , 100% . Die Nachfrage war mit $q_0 = 180$ Fz/h und $q_1 = 720$ Fz/h parametrisiert

Bei der maximalen Nachfrage verlängert die Anlage die Freigabezeiten bis zu der Grenze von 40 Sekunden und zeigt damit an, dass sie tatsächlich ihre Sättigung erreicht hat. Allerdings gilt das nur für einen Strom normaler Fahrzeuge. Sobald autonome Fahrzeuge hinzukommen, sinkt der Spitzenwert bei der Verlustzeit, und bei einer Ausstattungsrate von 50 Prozent wird nicht einmal mehr die maximale Freigabezeit erreicht. Das entspricht der Beobachtung in Abschn. 15.4, dass autonome Fahrzeuge nicht nur die Kapazität erhöhen, sondern auch zu einer Reduktion der Freigabezeiten beitragen – ein Effekt, der in diesem Beispiel hier ziemlich deutlich ist, schon ein kleiner Anteil autonom fahrender Fahrzeuge kann sich hier bemerkbar machen.

15.6 Grüne Welle mit autonomen Fahrzeugen

Die bisherigen Szenarien haben eine Kreuzung untersucht. Sehr viel interessanter ist der Fall eines Streckenabschnitts mit mehreren Kreuzungen hintereinander, die alle von einer LSA geregelt werden. In diesem Fall spielt die Koordination zwischen den Anlagen, umgangssprachlich als „grüne Welle“ bezeichnet, eine wichtige Rolle. Auch hier wird mithilfe einer Simulation untersucht, wie groß die Auswirkungen der Einführung von autonomen Fahrzeugen sind. Analog dem Vorgehen in [26] wird eine Strecke mit zehn Kreuzungen simuliert und dabei die Koordination verändert. Unverändert bleiben die Nachfrage, die konstant ist, die Grünzeiten und die Umlaufzeiten. Verändert wird lediglich der Offset, also der Zeitpunkt, zu dem die Anlage den Fahrzeugstrom in Fahrtrichtung freigibt. Wenn dieser Zeitversatz zwischen zwei Anlagen gerade der Reisezeit zwischen den beiden Anlagen entspricht, ist das System in seinem optimalen Zustand: Die Verlustzeit der Fahrzeuge an der stromabwärtigen Anlage ist exakt null, wenn die beiden Freigabe-

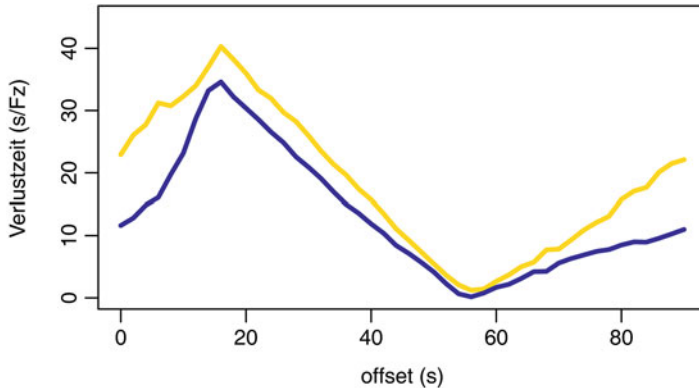


Abb. 15.8 Verlustzeit als Funktion der Versatzzeit für eine einfache grüne Welle. Dargestellt ist hier eine Simulation mit menschlichen Fahrern (gelbe Kurve) und eine nur mit autonomen Fahrzeugen (blaue Kurve). Gezeigt ist hier das beste Ergebnis, das zwischen der ersten und der zweiten Kreuzung erreicht wird

zeiten gleich sind. Dann ist einsichtig, dass genauso viele Fahrzeuge die Kreuzung passieren können, wie von der Anlage stromaufwärts losfahren.

Es lässt sich schon ahnen: In diesem Fall sind mit autonomen Fahrzeugen keine Verbesserungen zu erzielen, und genau das demonstriert das Simulationsergebnis in Abb. 15.8. Allerdings verbessern autonome Fahrzeuge im Falle von nicht-optimaler Koordinierung dann doch die Verlustzeiten. Das liegt daran, dass der Pulk von Fahrzeugen, der eine Anlage verlässt, stärker komprimiert ist als im Fall der menschlichen Fahrer.

15.7 Simulation einer Stadt

Im letzten Abschnitt soll untersucht werden, wie sich die Einführung autonomer Fahrzeuge in einer ganzen Stadt auswirken könnte. Zu diesem Zweck wird eine bestehende SUMO-Simulation [17], [23] der Stadt Braunschweig verwendet, um den Einfluss autonomer Fahrzeuge auf den Verkehrsablauf eines Verkehrssystems bewerten zu können.

Allerdings ist in SUMO das in Abschn. 15.2 eingeführte Modell nicht implementiert, sodass die Simulation mit den Modellen auskommen muss, die in SUMO verfügbar sind. Verwendet wird daher das in SUMO eingebaute Standardmodell, das bei der Beschreibung der Schwankungen der Fahrer nicht so ausgefeilt ist wie das hier eingeführte Modell.

Um das Modell aufzusetzen, wird ein modifiziertes Netz der Firma NavTeq verwendet, in Abb. 15.9 ist ein Ausschnitt des entsprechenden Verkehrsnetzes zu sehen, die ganze Simulation umfasst die gesamte Fläche der Stadt Braunschweig einschließlich der umgebenden Autobahnen. Insgesamt enthält das Simulationsnetz rund 129.000 Kanten.

Die notwendige Nachfrage nach Verkehr stammt aus einer Start/Ziel-Matrix der Firma ptv, die für verschiedene Tage der Woche und für jeden dieser Tage in 24 Zeitscheiben von

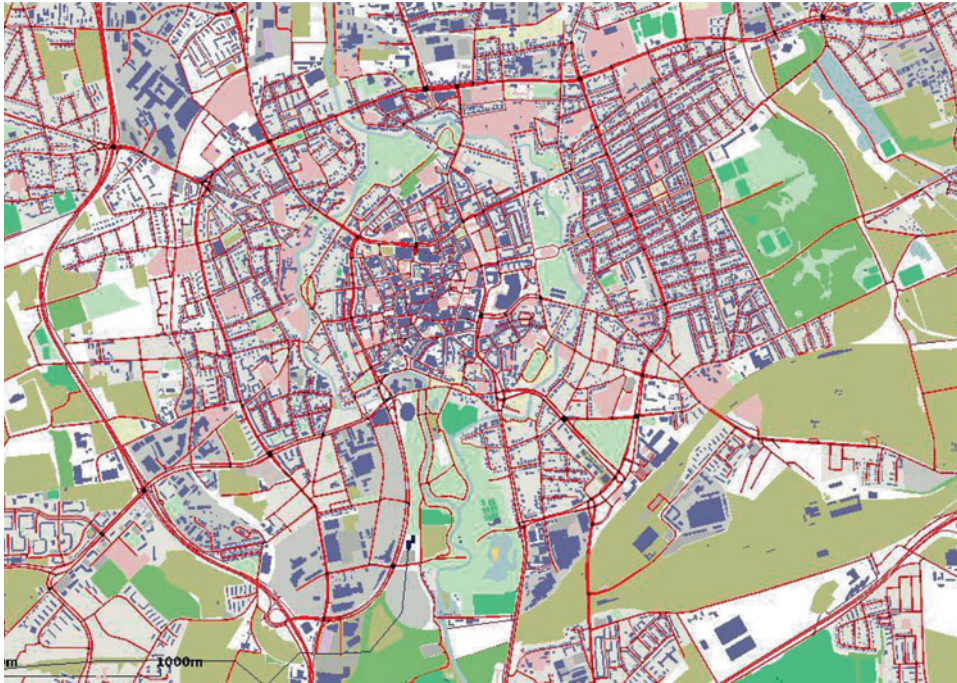


Abb. 15.9 Ausschnitt aus dem Simulationsnetz der Stadt Braunschweig. Die Flächennutzungsdaten stammen aus der OpenStreetMap-Datenbasis [24]

je einer Stunde Dauer vorliegt. Mit der Nachfrage wurde ein sogenanntes Nutzergleichgewicht ausgerechnet, das in diesem Fall rund 100 Iterationsschritte erforderte. Am Ende dieses Prozesses steht für jedes Fahrzeug, das in SUMO simuliert wird, eine Route, die optimal ist in dem Sinn, dass jede andere Route durch das Netz länger dauert. Insgesamt werden 647.000 Fahrzeuge simuliert. Erste Vergleiche mit realen Zähldaten aus Braunschweig deuten darauf hin, dass die Matrix die Nachfrage deutlich unterschätzt. Das hat sicherlich Auswirkungen auf die hier diskutierten Ergebnisse, allerdings konnten im Rahmen dieses Projektes solche Korrekturen nicht mehr umgesetzt werden.

Um autonome Fahrzeuge simulieren zu können, wird ein neuer Fahrzeugtyp eingeführt, der so ähnlich parametrisiert ist wie die Modelle in Abschn. 15.2: Die autonomen Fahrzeuge in SUMO fahren mit $\tau = 0,5$ s, alle anderen mit $\tau = 1$ und $\sigma = 0,5$. Dabei ist σ der Rauschparameter in SUMO, welcher vorgibt, um wie viel ein Fahrzeug von der optimalen Fahrweise abweicht. Die Wahl von $\tau = 0,5$ s führt dazu, dass auch die Schrittweite in SUMO auf 0,5 s gesetzt werden muss, damit die Fahrzeuge weiterhin ohne Zusammenstöße fahren können. Damit verlängert sich die Simulationszeit von rund 50 min auf 90 min für die Simulation eines ganzen Tages in Braunschweig.

Nur die Pkw wurden als autonome Fahrzeuge simuliert: Die rund 44.000 Lkw blieben unverändert. Ebenfalls nicht vollständig korrekt abgebildet sind in dieser Simulation die

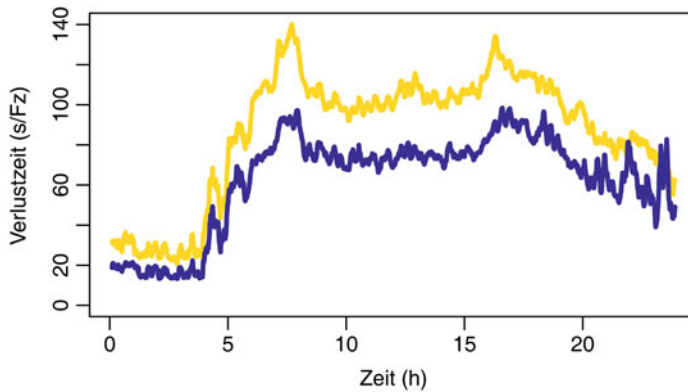


Abb. 15.10 Vergleich der Verlustzeiten zwischen einer Simulation mit menschlichen Fahrern (gelbe Kurve) und einer Simulation, bei der die Pkw autonom fahren (blaue Kurve). Jeder Datenpunkt ist ein gleitender Durchschnittswert aus den acht benachbarten Ein-Minuten-Werten. Die Streuung der Werte beider Kurven ist nicht sehr unterschiedlich und deshalb nicht dargestellt

Lichtsignalanlagen. Somit ist davon auszugehen, dass auch von dieser Seite weitere Korrekturen des unten stehenden Simulationsergebnisses zu erwarten sind.

Trotzdem liefert diese Simulation erste wichtige Erkenntnisse, die in Abb. 15.10 zu sehen sind. Selbst ohne weitere Maßnahmen ist das autonome System in dem Sinne effizienter, dass zwischen fünf und 80 Prozent Verlustzeit eingespart wird, mit einem Mittelwert von rund 40 Prozent. Mit den gewählten Parametern ändert sich allerdings die Varianz der Reisezeiten relativ wenig, das System wird somit zwar schneller, aber nicht unbedingt auch verlässlicher. Das könnte sich ändern, wenn auch das Verkehrsmanagement realistisch simuliert wird, entsprechende Arbeiten werden derzeit vorbereitet.

15.8 Fazit

In diesem Beitrag wurden erste Überlegungen angestellt, wie ein Verkehrsmanagement auf die Möglichkeiten des autonomen Fahrens eingestellt werden muss. Die präsentierten Fallbeispiele demonstrieren, dass je nach Szenario ganz verschiedene Verbesserungen im Verkehrsablauf durch das Einführen autonomer Fahrzeuge zu erreichen sind.

Leider lassen sich die zu erreichenden Verbesserungen schwer in eine einzige Zahl zusammenfassen. So wurde beispielsweise in Abschn. 15.4 demonstriert, dass die Kapazität einer LSA sich durchaus verdoppeln lässt. Ist an der entsprechenden Anlage die Nachfrage gering, so ist von dieser Verdoppelung relativ wenig zu merken. Arbeitet die Anlage hingegen am Rande ihrer Kapazität, dann führt schon eine geringfügige Erhöhung der Kapazität zu einer erheblichen Verbesserung.

Das lässt sich sehr schön anhand des Szenarios in Abschn. 15.5 nachvollziehen: Hier durchläuft die Nachfrage alle Werte von sehr gering bis zur (zeitweisen) Übersättigung.

Während bei kleiner Nachfrage sowohl die Freigabezeiten als auch die Verlustzeiten sich relativ wenig mit dem Einführen autonomer Fahrzeuge ändern, erreicht das System jenseits der Kapazität enorme Verbesserungen. Allerdings ist der Umfang dieser Verbesserungen wieder von den Details des betrachteten Szenarios abhängig. Wäre der Spitzenwert der Nachfrage nur ein wenig kleiner gewesen, dann wäre auch der Gewinn deutlich kleiner geworden.

Dennoch bleibt festzuhalten, dass zumindest im urbanen Kontext das Einführen autonomer Fahrzeuge das Potenzial hat, an den Lichtsignalanlagen deutlich Zeit zu gewinnen, die dann anderen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung steht – wenn das Einführen dieser Fahrzeuge nicht zu einer Erhöhung der Nachfrage nach automobilen Transport nach sich zieht.

Literatur

1. Winner, H.: Private Korrespondenz. (2014)
2. van Dijke, J., van Schijndel, M., Nashashibi, F., de la Fortelle, A.: Certification of Automated Transport Systems. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 48, 3461–3470 (2012)
3. Kesting, A.: *Microscopic Modeling of Human and Automated Driving: Towards Traffic-Adaptive Cruise Control*, Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, ISBN 978-3-639-05859-8 (2008)
4. Reuschel, A.: Fahrzeugbewegung in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug. *Zeitschrift des österreichischen Ingenieur und Architektenvereins*, 7/8, 95–98 (1950)
5. Chowdhury, D., Santen, L., Schadschneider, A.: Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Physics Reports* 329, 199–329 (2000)
6. Helbing, D.: Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems. *Reviews of Modern Physics* 73, 1067–1141 (2001)
7. Nagel, K., Wagner, P., Woesler, R.: Still flowing: approaches to traffic flow and traffic jam modelling. *Operations Research* 51, 681–710 (2003)
8. Treiber, M., Kesting, A.: *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. (2012)
9. Urmson C., et al: Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics* 25, 425–466 (2008)
10. Levinson, J. et al.: Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. In proceedings of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 163–168 (2011)
11. Campbell M., Egerstedt, M., How, J. P., Murray, R. M.: Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368, 4649–4672 (2010)
12. Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (2011)
13. Helly, W.: Simulation of bottlenecks in single lane traffic flow. *Proceedings of the symposium on theory of traffic flow* (1959)
14. Gipps, P.: A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B* 15, 105–111 (1981)
15. Krauß, S.: *Microscopic modelling of traffic flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Dissertation, Universität zu Köln (1998)
16. Krauß, S., Wagner, P., Gawron, C.: Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Physical Review E* 55, 5597–5602 (1997)

17. Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., Bieker, L.: Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5, 128–138 (2012)
18. Wagner, P.: Analyzing fluctuations in car-following. *Transportation Research Part B* 46, 1384–1392 (2012)
19. Jiang, R., Hu, M., Zhang, H.M., Gao, Z., Jia, B., Wu, Q., Wang, B., Yang, M.: Traffic Experiment Reveals the Nature of Car-Following. *PLoS ONE* 9: e94351. doi:10.1371/journal.pone.0094351 (2014)
20. Todosiev, E.P., L. C. Barbosa, L.C.: A proposed model for the driver-vehicle-system. *Traffic Engineering*, 34, 17–20, (1963/64)
21. Wagner, P.: A time-discrete harmonic oscillator model of human car-following. *European Physical Journal B* 84, 713–718 (2011)
22. Webster, F.V.: *Traffic Signal Settings*. Department of Scientific And Industrial Research Road Research Laboratory, (1958)
23. Krajzewicz, D., Furian, N., Tomàs Vergés, J.: Großflächige Simulation von Verkehrsmanagementansätzen zur Reduktion von Schadstoffemissionen. 24. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden, Deutschland (2014)
24. OpenStreetMap: www.openstreetmap.org, letzter Zugriff am 29.7.2014
25. Oertel, R., Wagner, P.: Delay-Time Actuated Traffic Signal Control for an Isolated Intersection. In: *Proceedings 90th Annual Meeting Transportation Research Board (TRB)* (2011)
26. Gartner, N.H., Wagner, P.: Traffic flow characteristics on signalized arterials. *Transportation Research Records* 1883, 94–100 (2004)

Bernhard Friedrich

Inhaltsverzeichnis

16.1 Einleitung 332

16.2 Charakteristika des Verkehrsflusses 332

 16.2.1 Kennwerte des Verkehrsablaufs 332

 16.2.2 Verkehrsflusstheorie 333

 16.2.3 Modell für stationäre Verkehrszustände – Fundamentaldiagramm 335

 16.2.4 Kapazität und Stabilität 336

16.3 Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge 339

 16.3.1 Streckenabschnitte von Autobahnen 339

 16.3.2 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage 344

 16.3.3 Abschätzung der Effizienzgewinne durch autonomes Fahren 346

16.4 Zusammenfassung und Ausblick 347

 16.4.1 Verkehr 347

 16.4.2 Infrastruktur 348

 16.4.3 Kooperation 349

Literatur 349

B. Friedrich (✉)
Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, Deutschland
friedrich@tu-braunschweig.de

16.1 Einleitung

Autonome Fahrzeuge nehmen selbstständig am Verkehr teil, ohne dass sie den Menschen als Überwacher oder Entscheider benötigen. Ihren Fahrgästen bieten autonome Fahrzeuge einen Komfortgewinn, da keine Fahraufgaben geleistet werden müssen. Einem Personenkreis, der bislang aufgrund von Mobilitätseinschränkungen von der Teilhabe am öffentlichen Leben teilweise oder ganz ausgeschlossen ist, bieten autonome Fahrzeuge neue Chancen für dessen Mobilität.

Neben den Vorteilen, die autonome Fahrzeuge für deren Nutzer bieten mögen, ist der gesellschaftliche Nutzen, der mit ihrer Verbreitung verbunden ist, von Interesse. Denn es ist offensichtlich, dass autonomes Fahren zu keinen Einbußen bei der Sicherheit oder der Effizienz des Straßenverkehrs führen darf, sondern diese verbessern soll. Dieser Beitrag untersucht in diesem Zusammenhang die verkehrlichen Wirkungen autonomer Fahrzeuge hinsichtlich der Effizienz, mit der die bestehende Infrastruktur genutzt werden könnte.

Die Effizienz von Verkehrsanlagen wird durch ihre Kapazität bestimmt. Auf den Fernstraßen ist die Kapazität im Wesentlichen durch den maximal möglichen Verkehrsfluss auf den Streckenabschnitten sowie die maximal möglichen Verflechtungs- und Ein- bzw. Ausfädelungsverkehrsstärken an den planfreien Knotenpunkten bestimmt. Im Stadtstraßennetz und auf Landstraßen mit Ortsdurchfahrten sind die Kapazitäten an den Knotenpunkten maßgebend und somit meist von den Lichtsignalanlagen abhängig. Während die Kapazität an Lichtsignalanlagen von den Zeitbedarfswerten bestimmt wird, die die einzelnen Fahrzeuge benötigen, um in der anfahrenden Kolonne den Knotenpunkt zu passieren, werden die Kapazitäten von Autobahnabschnitten durch die Instabilität bestimmt, die sich bei hohen Verkehrsstärken einstellt und zum Stau führt.

Für das Verständnis der Überlegungen zu den verkehrlichen Wirkungen autonomer Fahrzeuge werden in diesem Beitrag zunächst die Kennwerte des Verkehrsablaufs und ihre Zusammenhänge erläutert. Auf diesen Grundlagen aufbauend werden dann Überlegungen zum Einfluss autonomer Fahrzeuge auf die Kapazitäten von freien Strecken im Zuge von Fernstraßen sowie von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen abgeleitet. Die Auswirkungen autonomer Fahrzeuge auf die Verbindungsqualitäten von Fahrten, die über unterschiedliche Infrastrukturelemente verlaufen, können mit diesen Überlegungen nicht ausreichend beschrieben werden. Dennoch liefern die Betrachtungen eine erste Einschätzung, welche Optimierungspotenziale für die Effizienz des Verkehrsablaufs mit autonomen Fahrzeugen verbunden sein könnten.

16.2 Charakteristika des Verkehrsflusses

16.2.1 Kennwerte des Verkehrsablaufs

Zur mathematischen Abbildung des Verkehrsablaufs wird von einer Abstraktion des Wegernetzes, der Fahrzeuge, der Fahrer sowie deren Verhalten, d. h. von vereinfachenden Annahmen ausgegangen.

Das Wegenetz wird z. B. in freie Strecken und Knotenpunkte aufgeteilt. Gegenstand der Untersuchungen ist dann entweder die freie Strecke oder der Knotenpunkt, wobei gleichbleibende Bedingungen wie Ebenheit, ausreichende Sicht, trockene Fahrbahn etc. vorausgesetzt werden. Hinsichtlich Fahrer und Fahrzeug wird u. a. angenommen, dass deren Eigenschaften wie Reaktionszeit, Risikobereitschaft bzw. technischer Zustand empirisch nachgewiesenen Verteilungen folgen.

Es wird zwischen mehreren Formen der Beschreibung des Verkehrsablaufs unterschieden. Die mikroskopische Abbildungsweise beschreibt die verkehrlich relevanten Merkmale eines Einzelfahrzeugs i :

- zeitlicher Abstand $t_i(s)$,
- räumlicher Abstand $x_i(m)$,
- Geschwindigkeit $v_i(km/h)$.

Die makroskopische Abbildungsweise betrachtet eine Menge von Fahrzeugen und die relevanten Kennwerte eines Verkehrsstroms:

- Verkehrsstärke $q(Fz/h)$,
- Verkehrsdichte $k(Fz/km)$,
- mittlere Geschwindigkeit $v(km/h)$.

Der Verkehrsablauf lässt sich erfassen durch Messungen der Kennwerte an einem bestimmten Querschnitt über ein Zeitintervall dt durch sogenannte lokale Beobachtungen oder Messungen zu einem bestimmten Zeitpunkt über ein Wegintervall dx als sogenannte momentane Beobachtungen (s. Abb. 16.1).

16.2.2 Verkehrsflusstheorie

Weder die makroskopischen Kennwerte v , q und k noch die entsprechenden mikroskopischen Werte definieren für sich allein einen Verkehrszustand. Dazu ist die Kenntnis ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten Voraussetzung. Die drei makroskopischen Größen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und momentane (streckenbezogene) Geschwindigkeit sind durch die Gleichung

$$q = k \cdot v(k)$$

miteinander verknüpft. Messungen der Verkehrsstärke und der mittleren Geschwindigkeit ergaben eine nachweisbare Abnahme der Geschwindigkeit bei zunehmender Verkehrsstärke, d. h. mit zunehmender gegenseitiger Beeinflussung der Fahrzeuge.

Eines der ersten Modelle zur Beschreibung des Verkehrsablaufs auf der freien Strecke resultiert aus Beobachtungen von Greenshields [5], der den Zusammenhang zwischen

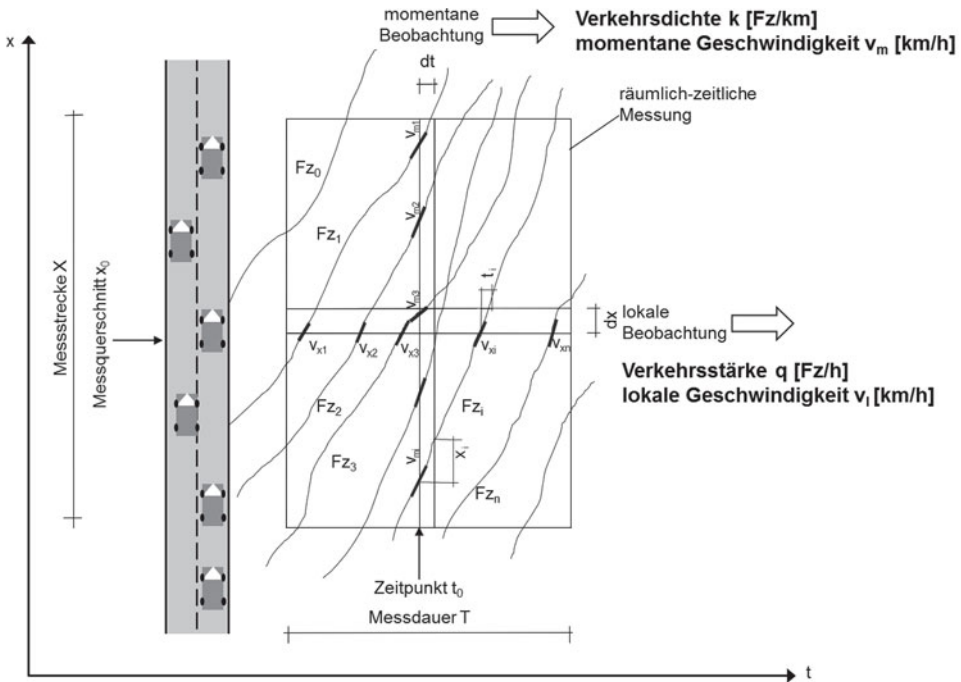


Abb. 16.1 Systematik lokaler und momentaner Messungen. Unterschiedliche Geschwindigkeiten ergeben sich für die lokal bzw. momentan erfassten Einzelgeschwindigkeiten

Geschwindigkeit v und der Verkehrsdichte k erforschte. Mithilfe der Regressionsrechnung stellte er einen linearen Zusammenhang für $v = v(k)$ fest

$$v(k) = v_f - \frac{v_f}{k_{max}} \cdot k = v_f \cdot \left(1 - \frac{k}{k_{max}}\right),$$

wobei v_f die freie Geschwindigkeit und k_{max} die maximale Verkehrsdichte darstellen.

Eingesetzt in die Gleichung $q = v \cdot k$ ergibt sich damit ein parabolischer Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte in der Form:

$$q(k) = v_f \cdot \left(k - \frac{k^2}{k_{max}}\right).$$

Gleichungen mit diesen Kenngrößen werden als Zustandsgleichungen und ihre grafische Repräsentation als Fundamentaldiagramme des Verkehrs bezeichnet.

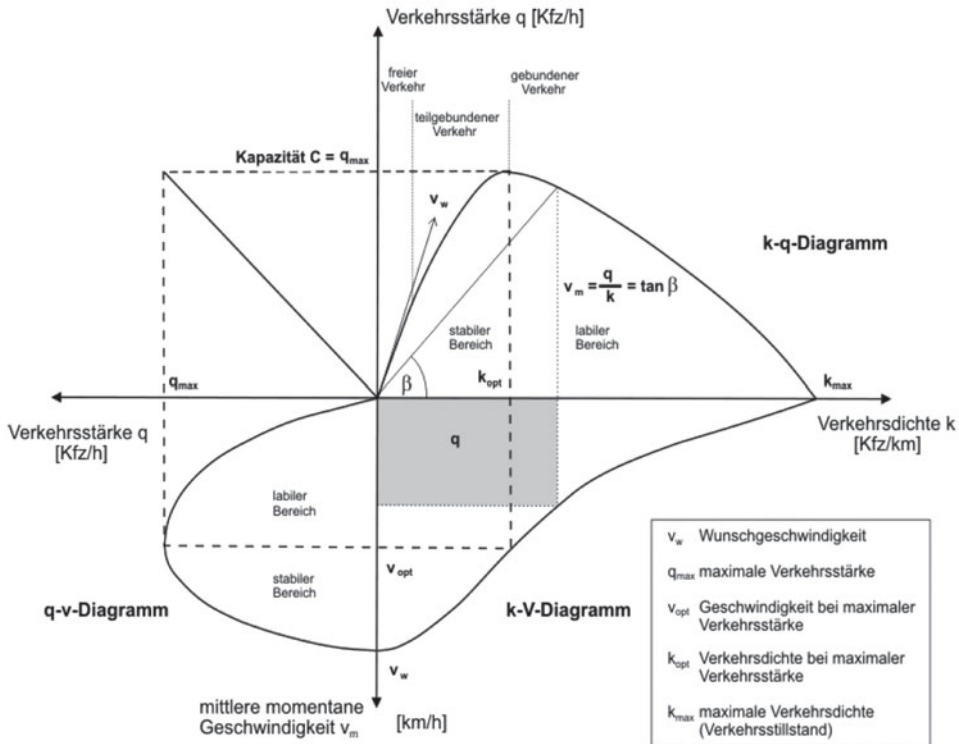


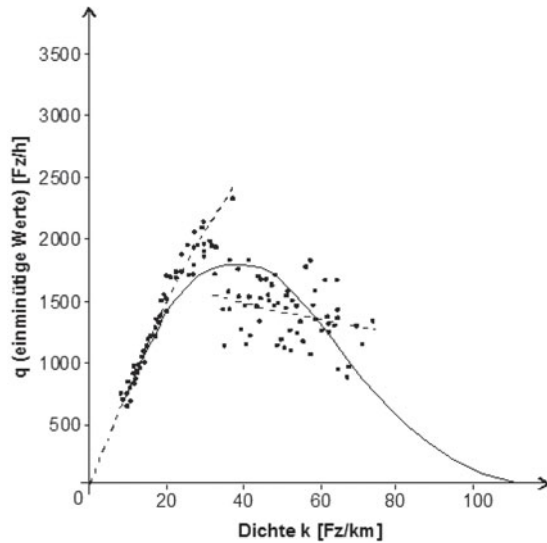
Abb. 16.2 Ansichten des Fundamentaldiagramms [3]

16.2.3 Modell für stationäre Verkehrszustände – Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm ist die grafische Abbildung der Zustandsgleichung des Verkehrs, also des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Kenngrößen Verkehrsstärke q , Verkehrsdichte k und mittlerer momentaner, d. h. abschnittsbezogener Geschwindigkeit v und stellt eine Kurve im dreidimensionalen Raum dar. Die orthogonalen Projektionen der Kurve auf die von jeweils zwei Kenngrößen aufgespannten Ebenen ergeben die in Abb. 16.2 gezeigten bekannten Ansichten des Fundamentaldiagramms. Die resultierenden drei Diagramme ermöglichen vielfältige Aussagen über die Charakteristik des Verkehrsflusses an einem Querschnitt und werden als q - v -Diagramm, q - k -Diagramm und k - v -Diagramm bezeichnet.

Das Fundamentaldiagramm lässt erkennen, dass bei gleicher Verkehrsstärke q_l zwei unterschiedliche Qualitäten des Verkehrsablaufs auftreten können. Die Schwelle q_{max} trennt für $q_i < q_{max}$ den Bereich hoher Geschwindigkeiten bei geringen Verkehrsdichten, also den freien und stabilen Verkehrsablauf, vom Bereich mit relativ niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Verkehrsdichten, dem Bereich des instabilen und gestörten Verkehrsablaufs. Empirische Untersuchungen zeigen, dass der Übergang zwischen den beiden Bereichen

Abb. 16.3 Fundamentaldiagramm mit getrennten Bereichen für stabilen und instabilen Verkehr für einzelne Fahrstreifen bzw. zweistreifige Fahrbahn [8]



nicht wie in der idealisierten Form in Abb. 16.2 kontinuierlich verläuft. Vielmehr erfolgt bei hohen Verkehrsstärken, ausgelöst durch Störungen im Verkehrsablauf, ein Übergang aus dem stabilen in den instabilen Bereich, der mit einem deutlichen Rückgang der Verkehrsstärke verbunden ist (s. Abb. 16.3).

Aus diesen Überlegungen heraus haben May und Keller [9] drei Formen des auftretenden Verkehrs charakterisiert:

- den freien Verkehr mit hohen Geschwindigkeiten und geringen Verkehrsstärken und -dichten,
- den teilgebundenen Verkehr, bis zu dem Bereich maximaler Verkehrsstärken, optimaler Geschwindigkeit und Verkehrsdichte,
- den gebundenen Verkehr mit hohen Verkehrsdichten, geringen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten.

16.2.4 Kapazität und Stabilität

Die Effizienz des Verkehrssystems ist abhängig von der Kapazität einer Verkehrsanlage, die als die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann“ definiert ist [3]. Die Kapazität bestimmt sich durch die Dichte der Fahrzeugkolonne und die Geschwindigkeit, mit der die Fahrzeugkolonne den Querschnitt passiert.

Die Verkehrsdichte wird durch die Abstände zwischen den Fahrzeugen festgelegt. Dabei gilt die Faustregel, dass der Sicherheitsabstand in Metern, den ein Fahrer zum voraus-

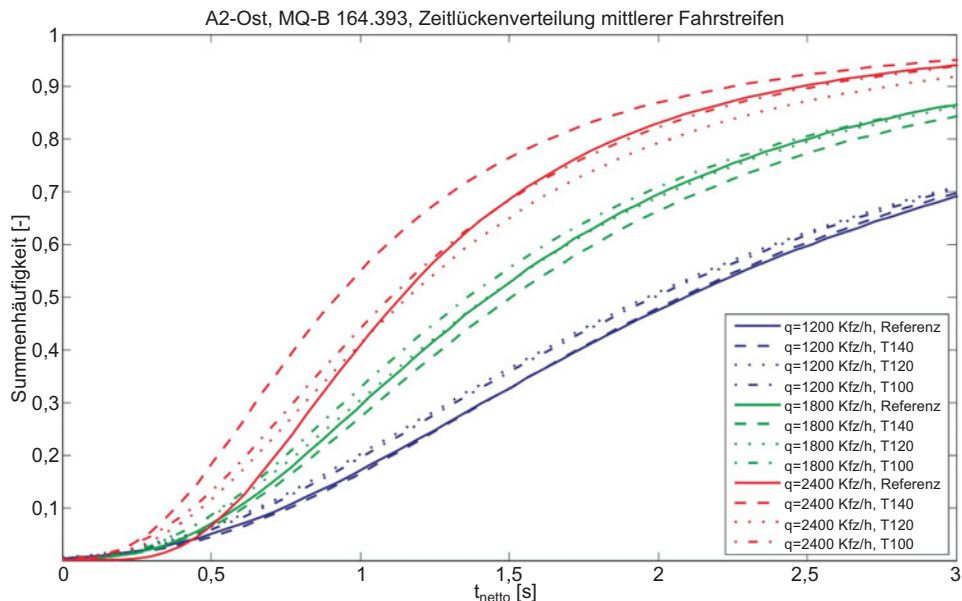


Abb. 16.4 Verteilungsfunktionen der Zeitlückenverteilung für unterschiedliche Verkehrsnachfragen und Geschwindigkeitsbeschränkungen [2]

fahrenden Fahrzeug einhalten soll, den halben Wert der aktuellen Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde beträgt. Diese allgemein bekannte Regel des „halben Tachoabstands“ geht von einer Reaktionszeit aus, die kleiner als $1,8\text{ s}$ ist, da bei diesem Wert und gleichbleibender Geschwindigkeit genau der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zurückgelegt wird. Dieser Mindestabstand wird auch üblicherweise in der Rechtsprechung gefordert (s. z. B. [7]). Für Lkw schreibt die Straßenverkehrsordnung bei Geschwindigkeiten über 50 km/h ausdrücklich einen Mindest-Wegabstand von 50 m vor, der bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für Fahrzeuge über $7,5\text{ t}$ auf Autobahnen eine Zeitlücke von $2,25\text{ s}$ erfordert.

Ausgehend von einer Reaktionszeit von $1,8\text{ s}$ kann in einem einfachen Ansatz die Kapazität eines Fahrstreifens also mit etwa 2000 Fahrzeugen pro Stunde angesetzt werden. Dies gilt gleichermaßen für Stadtstraßen wie für Landstraßen oder Autobahnen. Empirische Untersuchungen zeigen allerdings, dass die Zeitlücken im Mittel deutlich unterhalb der $1,8\text{ s}$ liegen und insbesondere bei hohen Verkehrsstärken Werte um die $1,0\text{ s}$ einnehmen. Die 15 \% -Perzentile der Verteilung liegt in diesen Fällen sogar bei Werten unter $0,5\text{ s}$ (s. auch Abb. 16.3). Dies bedeutet, dass 15 \% der Fahrzeuge mit Zeitlücken, die kleiner als $0,5\text{ s}$ sind, auf das vorausfahrende Fahrzeug folgen. Abb. 16.4 zeigt für unterschiedliche Verkehrsstärkenbereiche und unterschiedliche Geschwindigkeitsbeschränkungen die korrespondierenden Zeitlückenverteilungen.

Aufgrund der geringen Folgeabstände bei relativ hohen Geschwindigkeiten werden in empirischen Untersuchungen auch Kapazitäten ermittelt, die deutlich über den genannten

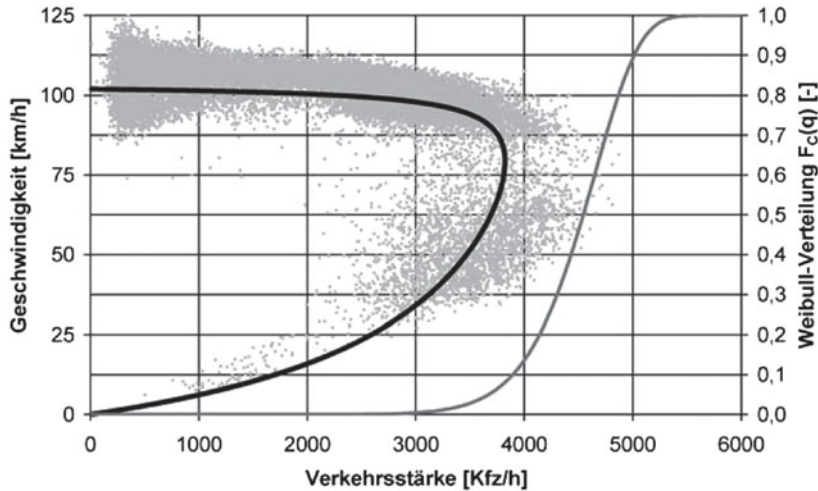


Abb. 16.5 Messwerte für Fünf-Minuten-Intervalle im q-v-Diagramm und die zugehörige Kapazitätsverteilung für einen zweistreifigen Autobahnquerschnitt [1]

2000 Kfz/h liegen können. Ferner zeigen diese Untersuchungen, dass es keinen exakten Wert gibt, bis zu dem der Verkehrsfluss immer stabil verläuft und genau dann zusammenbricht, wenn dieser Wert überschritten wird. Vielmehr ist zu beobachten, dass die Kapazität eine Zufallsgröße darstellt, die durch eine Verteilung dargestellt werden kann. Untersuchungen [1] an vielen Streckenabschnitten zeigen, dass Kapazitäten von Autobahnen typischerweise Weibull-verteilt sind und z. B. für dreistreifige Richtungsfahrbahnen eine Standardabweichung von ca. 600 Kfz/h (gemessen in Fünf-Minuten-Intervallen) und damit eine unerwartet breite Variabilität aufweisen.

Der Erwartungswert der Kapazität entspricht in dieser stochastischen Sichtweise einer Nennkapazität und stellt das 50 %-Perzentil der Verkehrsstärkewerte dar, die Ausgangspunkt eines Zusammenbruchs waren. Je näher die Verkehrsbelastung an dieser Nennkapazität bzw. darüber liegt, umso höher wird die Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs und eines Staus.

Der Zusammenbruch führt in allen Fällen über den Zustand des synchronisierten Verkehrs zum Stau, und auch die Erholung verläuft über den synchronisierten Verkehr zurück zu einem stabilen Verkehrsablauf mit höheren Geschwindigkeiten (s. Abb. 16.6). Die Verkehrsstärke geht in den Übergängen zum synchronisierten bzw. zum gestauten Verkehr jeweils zurück, und eine Erholung erfolgt auf einem niedrigeren Niveau. Dieser Effekt des *capacity drop* wird dadurch verursacht, dass die Fahrer beim Verlassen der stromabwärtigen Staufront einen größeren Abstand einhalten als zuvor im fließenden Verkehr vor dem Zusammenbruch.

Nach Hall und Agyemang-Duah [6] liegt dieser *capacity drop* bei 5–6%, Untersuchungen von Brilon und Ponzlet [10] auf deutschen Autobahnen ergaben Werte zwischen 4 und 12%.

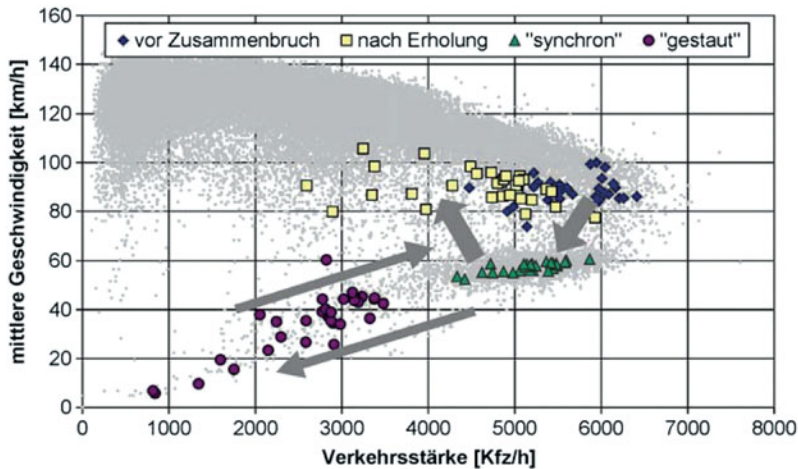


Abb. 16.6 Muster der Verkehrsdynamik mit den Übergängen zwischen den Zuständen des stabilen in den synchronen und gestauten Verkehr. Die Werte wurden an einer dreistreifigen Fahrbahn in Fünf-Minuten-Intervallen gemessen [1]

16.3 Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge

Die Effizienz des Verkehrssystems ist abhängig von der Kapazität einer Verkehrsanlage. Bei einer Nutzung der Verkehrsanlage durch autonom fahrende Fahrzeuge wird sich die Kapazität gegenüber einer Nutzung durch menschliche Fahrer verändern. Für den Verkehrsfluss sind entweder die Kapazitäten der Streckenabschnitte oder der Knotenpunkte maßgebend. Während für die Leistungsfähigkeit städtischer Straßennetze vor allem die Kapazitäten der Knotenpunkte und dort der Lichtsignalanlagen relevant sind, sind auf Autobahnen auch die Kapazitäten freier Strecken ausschlaggebend. Aus diesem Grund betrachten die folgenden Überlegungen die Kapazitäten für beide Fälle unter Berücksichtigung, dass ein noch nicht bekannter Anteil der Fahrzeuge autonom fährt.

16.3.1 Streckenabschnitte von Autobahnen

16.3.1.1 Kapazität

Die Kapazität eines Fahrstreifens ist festgelegt durch die maximale Anzahl von Fahrzeugen, die einen Querschnitt während einer Zeiteinheit passieren können. Sie bestimmt sich durch die Dichte der Fahrzeugkolonne und der Geschwindigkeit, mit der die Fahrzeugkolonne den Querschnitt passiert. Die Zustandsgleichung, die das Verhältnis dieser grundlegenden Kenngrößen des Verkehrsablaufs beschreibt, lautet:

$$q = k \cdot v(k).$$

In einem homogenen Verkehrsfluss ist die Dichte einfach zu bestimmen und ergibt sich aus dem Reziprok des Platzbedarfs eines Fahrzeugs [11]:

$$k = \frac{1}{vT_h + L}.$$

In diesem Zusammenhang ist T_h der zeitliche Abstand (Zeitlücke) zum vorausfahrenden Fahrzeug und L die Länge eines Fahrzeugs. Da die Kapazität die maximale Verkehrsstärke q_{max} darstellt, ist diese folglich eine Funktion von v , T_h und L . Für den Fall, dass ausschließlich menschliche Fahrer die Fahrzeuge steuern, ergibt sich die Kapazität C_h mit:

$$C_h = q_{max} = \frac{v}{vT_h + L}.$$

Analog wird die Kapazität C_a in einem rein durch autonome Fahrzeuge zusammengesetzten Verkehrsfluss durch die folgende Funktion beschrieben, in der T_a die von autonomen Fahrzeugen bevorzugte Zeitlücke darstellt:

$$C_a = \frac{v}{vT_a + L}.$$

Das Verhältnis der beiden Kapazitätswerte und damit die Veränderung der Kapazität wird durch den Zusammenhang

$$C_a / C_h = (vT_h + L) / (vT_a + L)$$

beschrieben.

Für die Abschätzung des Einflusses autonomer Fahrzeuge auf die Kapazität werden für die Parameter der Kapazitätsformel Größen verwendet, die für heutige Verhältnisse empirisch nachgewiesen sind. So erscheint es sinnvoll als mittlere Geschwindigkeit, bei der die Kapazität erreicht wird, den Wert $v = 80 \text{ km/h}$ ($22,2 \text{ m/s}$) anzunehmen. Für den Platzbedarf eines mittleren Personenkraftwagens wird das bekannte Maß einer mittleren Fahrzeuglänge von $4,5 \text{ m}$ und eines minimalen Sicherheitsabstands zum Vordermann von $3,0 \text{ m}$ und somit $L_{pkw} = 7,5 \text{ m}$ verwendet. Als mittlere Länge eines Lastkraftwagens werden 18 m als gewichtetes Mittel der Längen eines Lastzuges ($18,75 \text{ m}$) und eines Sattelschleppers ($16,50 \text{ m}$) angesetzt. Für den Platzbedarf eines Lastkraftwagens ergeben sich unter Berücksichtigung von $3,0 \text{ m}$ Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug $L_{Lkw} = 21 \text{ m}$. Als realistische Größe für den mittleren zeitlichen Folgeabstand bei hohen Verkehrsstärken liefern die empirischen Untersuchungen einen Wert von $T_h = 1,15 \text{ s}$.

Für die Veränderung der Kapazität bei autonomem Fahren ist die veränderte Folgezeitlücke T_a ausschlaggebend. Als technisch realisierbar und zugleich aus Sicht der Verkehrsteilnehmer akzeptabel erscheint hierfür ein Wert von $T_a = 0,5 \text{ s}$. Dieser sehr kurze Folgeab-

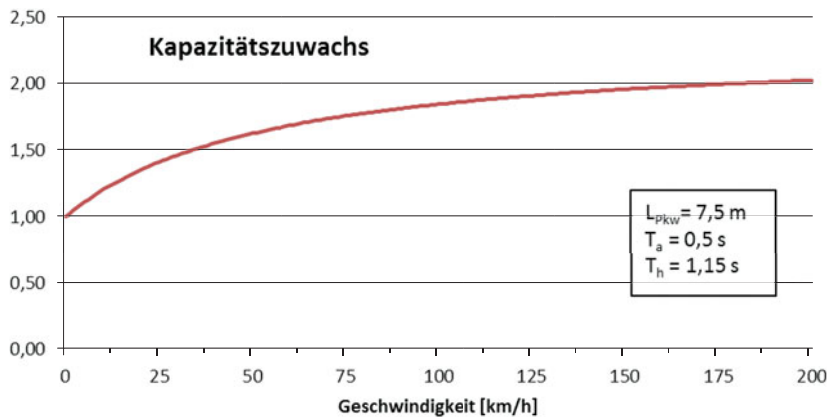


Abb. 16.7 Kapazitätzuwachs, der sich bei einer ausschließlich autonomen Fahrzeugflotte (nur Pkw) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ergeben würde

stand tritt bereits heute in Abhängigkeit der Verkehrsverhältnisse bei bis zu 20 % aller Folgeabstände auf. Insofern scheint dieser Abstand akzeptabel, sofern aus technischer Sicht die Sicherheit gewährleistet ist.

Für die unterstellten Größen würde sich bei Verwendung der oben hergeleiteten Formeln die Kapazität und damit der maximale Durchfluss im Falle eines rein autonomen Verkehrs deutlich erhöhen (Faktor 1,78) (s. Abb. 16.7).

Gegenüber den heute beobachteten Kapazitätswerten eines Fahrstreifens von 2200 Kfz/h wäre damit bei einem rein autonomen Verkehr eine Steigerung der Verkehrsstärke auf etwa 3900 Kfz/h möglich.

Wird der Schwerverkehr im Verkehrsfluss berücksichtigt, so kann der mittlere Platzbedarf der Fahrzeuge aus einer mit dem Schwerverkehrsanteil ω gewichteten Summe gebildet werden. Die Verkehrsdichte erhält man dann wiederum aus dem Reziprok des mittleren Platzbedarfs eines Fahrzeugs mit

$$k = \frac{1}{(1-\omega)(vT_h + L_{Pkw}) + \omega(vT_h + L_{Lkw})}.$$

Für die Kapazität ergibt sich bei dieser Betrachtung der Zusammenhang

$$C = \frac{v}{(1-\omega)(vT_a + L_{Pkw}) + \omega(vT_a + L_{Lkw})}.$$

Geht man von einer für den autonomen Verkehr auf Autobahnen moderaten Geschwindigkeit von 80 km/h aus, so erhält man den im folgenden Diagramm dargestellten funktionalen Zusammenhang. Für einen auf deutschen Autobahnen typischen Lkw-Anteil von 15 % würde sich dann eine Kapazität von etwa 3877 Kfz/h und damit nahezu der doppelte Wert

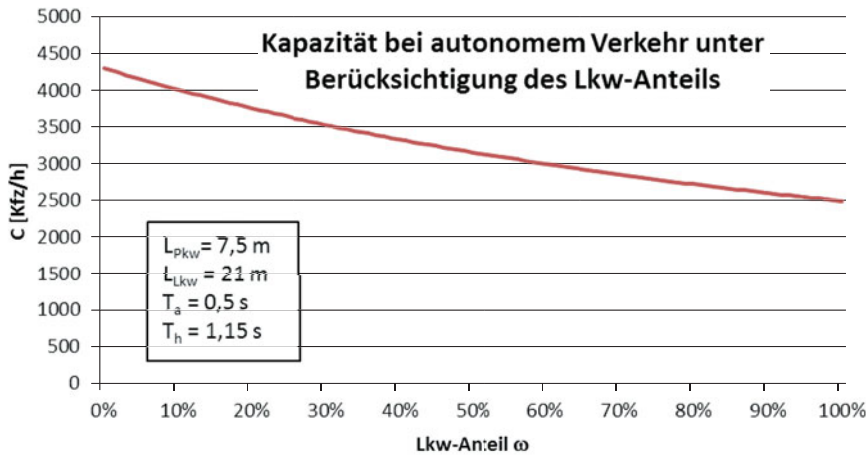


Abb. 16.8 Kapazität eines Fahrstreifens bei rein autonomem Verkehr in Abhängigkeit des Lkw-Anteils

gegenüber heute empirisch nachgewiesenen Kapazitäten einstellen. Setzt man in die Kapazitätsformel für eine Plausibilitätsprüfung $T_a = 1,15 \text{ s}$ bei ansonsten unveränderten Parametern, ergibt sich bei einem Schwerverkehrsanteil von 15 % eine Kapazität von etwa 2280 Kfz/h . Dieser Wert entspricht den bei heutigen Verhältnissen gemessenen Kapazitäten und bestätigt die richtige Wahl des Rechenansatzes sowie der Parameter.

Bei gemischtem Verkehr, in dem autonome Fahrzeuge mit einem Anteil von η am Gesamtaufkommen vertreten sind, ist die Kapazität C_m zusätzlich von der Anteilsgröße η abhängig:

$$C_m = \frac{v}{\eta v T_a + (1 - \eta) v T_h + L_{pkw}}.$$

Setzt man auch hier wiederum mit $v = 80 \text{ km/h}$ und $L_{pkw} = 7,5 \text{ m}$ realistische Größen in die Gleichung ein, ergibt sich der im folgenden Diagramm dargestellte Zusammenhang (s. Abb. 16.9). Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Kapazität bei geringeren Ausstattungsraten unterproportional anwächst und bei $\eta = 0,5$ erst einen Wert von etwa 3100 Pkw/h und damit von 36 % der möglichen Steigerung bei Vollaussattung erreicht.

Berücksichtigt man darüber hinaus, dass autonome Fahrzeuge einen zusätzlichen Abstand auf ein von einem menschlichen Fahrer gelenktes Fahrzeug lassen sollten, um diesen Fahrer nicht zu bedrängen, wird die Bestimmung der Kapazität etwas komplizierter. In dieser Betrachtung müssen die Kombinationen aufeinanderfolgender Fahrzeuge (a-a, a-h, h-a, und h-h) und die zugehörigen Zeitlücken (T_{aa} , T_{ah} , T_{hx}) betrachtet werden, um zu einer modifizierten Kapazitätsgleichung zu gelangen:

$$C_m = \frac{v}{\eta^2 v T_{aa} + \eta(1 - \eta) v T_{ah} + (1 - \eta) v T_{hx} + L}.$$

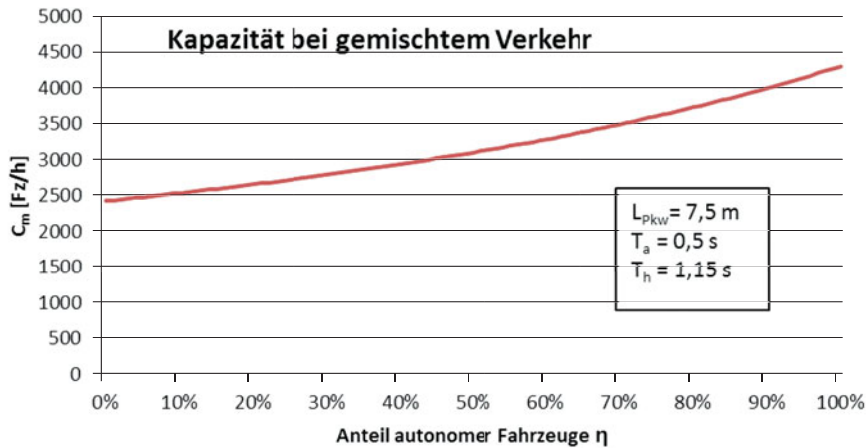


Abb. 16.9 Kapazität eines Fahrstreifens in Abhängigkeit des Anteils autonomer Fahrzeuge bei reinem Pkw-Verkehr

Als realistische Werte können für die Zeitlückendauern die Werte $T_{aa} = 0,5 \text{ s}$, $T_{ah} = 0,9 \text{ s}$, $T_{hx} = 1,15 \text{ s}$ angenommen werden. In dieser Betrachtung steigt die Kapazität in Abhängigkeit der Ausstattungsrate im unteren Bereich noch etwas langsamer an und erreicht für $\eta = 0,5$ einen Wert von 2850 Kfz/h , um bei einer Ausstattung von 100 % den Kapazitätswert von knapp 4300 Kfz/h zu erreichen (s. Abb. 16.10).

Dieselbe Vorgehensweise kann für die Abschätzung der Kapazität für reinen Lkw-Verkehr angewendet werden, der auf einem Fahrstreifen einer Autobahn organisiert werden könnte. Bei unveränderten Annahmen für die erforderlichen Zeitlücken wird der Platzbedarf wiederum mit $L = 21 \text{ m}$ gewählt. Mit diesen Eingangswerten ergibt sich bei rein autonomem Fahren ein Kapazitätswert von 2420 Lkw/h anstatt der bei menschlichen Fahrern erreichbaren 1720 Lkw/h .

16.3.1.2 Stabilität

Neben der Kapazität, die die größte Verkehrsstärke darstellt, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann, ist insbesondere die Stabilität des Verkehrsablaufs für die Effizienz von Bedeutung. Deutlich wird dies, wenn die Kapazität als stochastische Größe betrachtet wird, die die Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke wiedergibt. Je größer die Standardabweichung in der Wahrscheinlichkeitsverteilung ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs bereits bei geringeren Verkehrsstärken und damit die Instabilität.

Kommt es zum Zusammenbruch, vermindert sich durch den Effekt des *capacity drop* die Kapazität spürbar in der in der o.g. Literatur [10] angegebenen Größenordnung von etwa 10 %.

Verschiedene orts- und zeitabhängige Faktoren führen bei gleicher Fahrstreifenanzahl und gleichen verkehrlichen Randbedingungen (Verkehrsstärke, Schwerverkehrsanteil) zu



Abb. 16.10 Kapazität eines Fahrstreifens in Abhängigkeit des Anteils autonomer Fahrzeuge bei reinem Pkw-Verkehr unter Berücksichtigung größerer Folgezeitlücke von autonomen Fahrzeugen auf von Fahrern gelenkte Fahrzeuge

unterschiedlichen Verteilungsfunktionen der Kapazität. Wesentliche Einflussfaktoren sind in diesem Zusammenhang die Geschwindigkeits- und die Zeitlückenverteilungen. Je geringer die Standardabweichungen sind, umso stabiler ist der Verkehrsablauf und umso weniger Zusammenbrüche sind auch bei hohen Verkehrsstärken zu erwarten.

Autonome Fahrzeuge werden, insbesondere wenn sie durch Kommunikation untereinander die Aktionen der vorausfahrenden Fahrzeuge antizipieren können, zu einer Verstärkung des Verkehrsablaufs und somit zur Stabilität beitragen. Bei einem rein autonomen Verkehr ist davon auszugehen, dass eine vollständige Stabilität erreicht wird und ein Kapazitätsabfall vermieden werden kann.

16.3.2 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

Da Knotenpunkte im Zuge höher belasteter Straßen in der Regel mit Lichtsignalanlagen geregelt werden, beziehen sich die folgenden Überlegungen auf die Kapazitäten von Knotenpunkten mit Lichtsignalsteuerung.

Bei hoher Verkehrsnachfrage kommt es an signalisierten Knotenpunkten unabhängig von der Koordinierung der Lichtsignalanlagen zu einem ständigen Rückstau. Deshalb erfolgt die Anfahrt der wartenden Fahrzeugkolonne bei Beginn der Freigabezeit regelmäßig aus dem Stand. Wenn das erste Fahrzeug bei Beginn der Freigabe angefahren ist, folgt das nächste, wenn ein bestimmter zeitlicher Abstand erreicht ist. Dieser zeitliche Abstand wird durch den Zeitbedarfswert repräsentiert, der für Standardbedingungen (keine Längsneigung, Geradeausverkehr, ausreichende Fahrstreifenbreite) und reinen Pkw-Verkehr $t_b = 1,8 \text{ s}$ beträgt [4]. Dies entspricht einer Sättigungsverkehrsstärke von $q_s = 2000 \text{ Pkw/h}$. Für Lkw und Busse werden als Zeitbedarfswert $t_b = 3,15 \text{ s}$ und für Lastzüge $t_b = 4,5 \text{ s}$ angegeben.

Im Kolonnenstart kann der Anfahrzeitpunkt aufgrund der Bewegung der vorausfahrenden Fahrzeuge antizipiert werden. Dadurch reduziert sich die Reaktionszeit auf das Losfahren des direkten Vordermanns und kann mit $T_h = 0,6 \text{ s}$ angenommen werden. Für einen mittleren Platzbedarf eines Pkw im Rückstau vor einer Lichtsignalanlage von $7,5 \text{ m}$ (bei einer Fahrzeuglänge von $4,5 \text{ m}$ und einem Abstand von Stoßstange zu Stoßstange von $3,0 \text{ m}$) sowie plausiblen Werten für die durchschnittliche Geschwindigkeit $v = 22,5 \text{ km/h}$ an der Haltlinie der Lichtsignalanlage erhält man über den Zusammenhang $t_b = T_h + L/v = 1,8 \text{ s}$ eine Bestätigung des Zeitbedarfswerts. Dies gilt in gleicher Weise für die Zeitbedarfswerte von Lkw und Lastzügen mit einer Länge von 12 m bzw. 18 m . Folglich kann die Sättigungsverkehrsstärke eines Fahrstreifens an einer Lichtsignalanlage mit der Zustandsgleichung angegeben werden:

$$q_s = \frac{v}{vT_h + L}.$$

Für die Betrachtung der Sättigungsverkehrsstärken rein autonomem und gemischten Verkehrs gelten die Zusammenhänge, die für die Kapazität von Streckenabschnitten abgeleitet wurden mit den hier für den Kolonnenstart an Lichtsignalanlagen unterstellten Werten von $v = 22,5 \text{ km/h} = 6,25 \text{ m/s}$, $T_h = 0,6 \text{ s}$. Für das autonome Fahren wird unterstellt, dass die Reaktionszeit bzw. der Sicherheitsabstand auch im dichten und langsamen Stadtverkehr folgende Werte nicht unterschreiten soll: $T_a = 0,3 \text{ s}$, $T_{aa} = 0,3 \text{ s}$, $T_{ah} = 0,6 \text{ s}$, $T_{hx} = 0,6 \text{ s}$.

Die Kapazität eines Fahrstreifens an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage wird einerseits von den Sättigungsverkehrsstärken und andererseits von der zur Verfügung stehenden Freigabezeit bestimmt. Die Freigabezeiten, die während einer Stunde den verschiedenen Verkehrsströmen zur Verfügung gestellt werden können, sind ihrerseits abhängig von der Umlaufzeit und den Zwischenzeiten. In den Hauptverkehrszeiten wird meist eine Umlaufzeit von 90 s gewählt, sodass während einer Stunde die Zwischenzeiten 40-mal berücksichtigt werden müssen. Geht man von einem typischen, im Zuge einer städtischen Hauptverkehrsstraße gelegenen Knotenpunkt aus, so kommt für diesen häufig ein dreiphasiges Signalprogramm zum Einsatz. Die für eine Hauptrichtung relevanten Zwischenzeiten in den drei Phasenübergängen summieren sich in der Größenordnung auf 20 s und sind im Wesentlichen von den Räumzeiten der quer laufenden Fußgänger abhängig. Bei einer Umlaufzeit von 90 s verbleiben dann noch 70 s für die Freigabezeiten der verschiedenen Ströme. Unterstellt man, dass von der verbleibenden Freigabezeit 50% für die Ströme der Hauptrichtung zur Verfügung stehen, ergibt sich während einer Stunde eine Freigabezeit von 1400 s bzw. ein Freigabezeitanteil von $p_F = 38,89 \%$, also ein Anteil, der in der Größenordnung von etwa 40% liegt.

Bei konfliktfreier Signalisierung (d.h. keine bedingten Verträglichkeiten z.B. mit parallel geführten Fußgängern) kann vor diesem Hintergrund die Kapazität von gemischten Verkehrsströmen mit dem o. g. Ansatz ermittelt werden:

$$C_{LSA} = q_s \cdot p_F = \frac{v \cdot p_F}{vT_h + L}.$$

Für heutige Verhältnisse mit ausschließlich durch Menschen gesteuerten Fahrzeugen ergibt sich damit bei Verwendung der o. g. Werte eine Kapazität etwa 800 Pkw/h je Fahrstreifen. Bei einem rein autonomen Verkehr mit $T_a = 0,3 \text{ s}$ würde sich die Kapazität auf etwa 1120 Pkw/h und damit um etwa 40 % erhöhen. Für eine gemischte Zusammensetzung der Verkehrsströme liegen die Effizienzgewinne zwischen diesen angegebenen Werten und können mit den oben eingeführten Formeln bestimmt werden.

Die Formel macht außerdem deutlich, dass neben der Dauer der Folgezeitlücken vor allem die Geschwindigkeit von Bedeutung für die Kapazität ist. Mit steigender Räumgeschwindigkeit wächst die Kapazität bei autonomem Verkehr überproportional gegenüber einem Verkehr mit Menschen als Fahrern (s. Abb. 16.11). Gelingt es also, beim autonomen Fahren neben den kürzeren Zeitlücken auch ein zügigeres Anfahren und Räumen zu erreichen, ist damit ein deutlich höherer Kapazitätsgewinn als die oben angegebenen 40 % zu erwarten.

16.3.3 Abschätzung der Effizienzgewinne durch autonomes Fahren

Die Abschätzungen der Wirkung autonomer Fahrzeuge auf die Kapazität als Maß für die Effizienz von Verkehrsanlagen zeigen signifikante Steigerungspotenziale sowohl für die Streckenabschnitte von Fernstraßen als auch für die Knotenpunkte im Zuge städtischer Hauptverkehrsstraßen.

Im Stadtverkehr könnte bei rein autonomem Verkehr eine Kapazitätserhöhung von etwa 40 % erreicht werden, während die Kapazitäten auf Autobahnabschnitten um etwa 80 % gesteigert werden könnten. Der deutliche Unterschied in den Steigerungspotenzialen ist in der durchschnittlichen Geschwindigkeit, mit der die Verkehrsanlagen befahren werden, begründet. Dies wird aus dem Verlauf des Funktionsgraphen in Abb. 16.7 deutlich, der einen überproportionalen Anstieg der Kapazität im Bereich geringerer Geschwindigkeiten zeigt und hin zu höheren Geschwindigkeiten abflacht. Bei Erreichen der Kapazität liegen die Geschwindigkeiten auf Autobahnen bei etwa 80 km/h . Auf städtischen Hauptverkehrsstraßen ergibt sich beim für die Kapazität maßgebenden Kolonnenstart an Lichtsignalanlagen eine durchschnittliche Geschwindigkeit von etwa 20 km/h . Wegen dieses Unterschieds in den Geschwindigkeiten wirken sich autonome Fahrzeuge sehr unterschiedlich auf die Kapazität der Verkehrsanlagen aus.

Neben dem Kapazitätswert, der unter Berücksichtigung autonomer Fahrzeuge erreicht werden kann, ist insbesondere die Stabilität des Verkehrsablaufs bei hohen Verkehrsstärken von Bedeutung. Im Stadtverkehr kommt es zwar ab einer Auslastung von 70 %–80 % zu einem ständigen Rückstau vor den maßgebenden Lichtsignalanlagen, weshalb bei hohen Belastungen eine Durchfahrt ohne Halt (grüne Welle) nicht mehr möglich ist, aber es entsteht kein Leistungsabfall (*capacity drop*), wie dies im Außerortsverkehr und vor allem auf Autobahnen der Fall ist. Insofern ist die Stabilität des Verkehrsablaufs im städtischen Straßennetz bis zum Erreichen der Kapazität nicht gefährdet und erst bei einer Überlastung kommt es zu Blockaden in den Knotenpunkten.

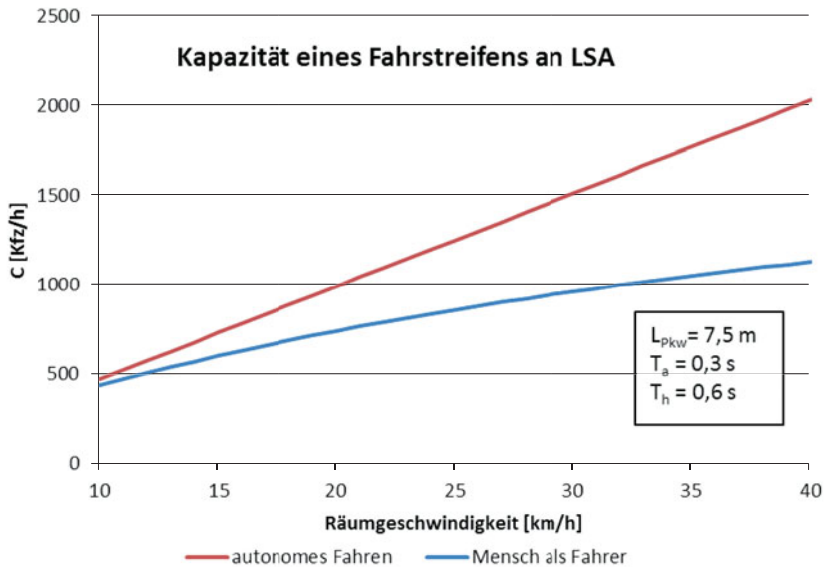


Abb. 16.11 Kapazitätswerte für einen Fahrstreifen an einer Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der Räumgeschwindigkeit

16.4 Zusammenfassung und Ausblick

16.4.1 Verkehr

Die Überlegungen mithilfe der makroskopischen Modelle des Verkehrsflusses zeigen, dass durch autonome Fahrzeuge grundsätzlich eine signifikante Kapazitätssteigerung zu erwarten ist, wodurch bestehende Verkehrsinfrastrukturen effizienter genutzt werden könnten. In Verbindung mit der erwarteten Steigerung der Kapazität für bestehende Verkehrsinfrastrukturen reduzieren sich Stauungen und Verlustzeiten, wodurch in der Folge die Qualität des Verkehrsablaufs erhöht wird. Insbesondere zwei Effekte bewirken die Kapazitätssteigerung:

1. Ein Effekt ist die Reduktion der Zeitlücken zwischen autonomen Fahrzeugen. In diesem Zusammenhang erscheint es bedeutsam, dass der Fahrkomfort trotz kurzer Zeitlücken durch die Antizipation der Aktionen der vorausfahrenden Fahrzeuge und der dadurch ermöglichten geringeren Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswerte gesichert wird. Dies könnte auch für die Kolonnenstabilität von Bedeutung sein. Für die Antizipation erscheint die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und auch zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur eine wichtige Voraussetzung zu sein.
2. Neben der Zeitlückendauer ist die Geschwindigkeit des Fahrzeugpulkus von großer Bedeutung. Je höher die Geschwindigkeit bei konstanter Dichte ist, umso höher ist die Verkehrsstärke an einem Querschnitt. Hohe Geschwindigkeiten bei gleichbleibender

Verkehrsdichte sind jedoch nur im rein autonomen Verkehr möglich. Bereits ein von einem Menschen gelenktes Fahrzeug würde in der Kolonne zu langsameren Geschwindigkeiten führen und den Kapazitätsgewinn reduzieren.

16.4.2 Infrastruktur

Die entwickelten Modelle für den Verkehrsfluss und die Kapazität unter Berücksichtigung eines Anteils autonomer Fahrzeuge zeigen, dass die Kapazität mit dem Anteil autonomer Fahrzeuge überproportional anwächst. Dabei ist zu bemerken, dass die Verkürzung der Zeitlücken schon ab dem ersten autonomen Fahrzeug wirkt, die Steigerung der Geschwindigkeit bei hohen Dichten hingegen nur für rein autonomen Verkehr und damit bei höheren Ausstattungsraten möglich sein wird.

Die Einführung autonomer Fahrzeuge wird nach Meinung des Autors nur über deren Fähigkeit gelingen, sich im gemischten Verkehr sicher zu bewegen, da reservierte Bewegungsflächen gerade bei geringen Ausstattungsraten weder ökonomisch noch sozial zu vertreten wären. Sobald jedoch eine ausreichende Anzahl Fahrzeuge mit autonomen Fähigkeiten im Verkehr sein werden, wird es für die Effizienz des Verkehrs sehr vorteilhaft sein, autonomes Fahren auf reservierten Fahrstreifen zu konzentrieren. Durch eine Separierung kann wegen des nicht-linearen Verlaufs der Kapazität über dem Anteil autonomer Fahrzeuge der Nutzen maximiert werden. In Verbindung mit speziell gewidmeten Fahrstreifen könnte zudem die Kolonnengeschwindigkeit selbst bei größerer Verkehrsnachfrage erhöht werden, was zu weiteren deutlichen Kapazitätsgewinnen führen würde. Dies ist bei gemischtem Verkehr nicht möglich, da selbst bei wenigen von Menschen gelenkten Fahrzeugen diese die Geschwindigkeit vorgeben würden.

Im Rahmen einer ersten Auseinandersetzung mit dem weitreichenden Thema wurden bewusst in diesem Beitrag ausschließlich die verkehrlichen Wirkungen autonomer Fahrzeuge auf Streckenabschnitten von Autobahnen und – repräsentativ für den Stadtverkehr – an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage untersucht. Diese beiden Fahrsituationen bestimmen zu einem hohen Anteil die Qualität des Verkehrsablaufs. Daneben gibt es jedoch eine Reihe weiterer relevanter Fahrsituationen, die auf die Kapazität des Gesamtsystems einen signifikanten Einfluss haben können:

1. Außerorts sind dies an den Knotenpunkten der Fernstraßen die Einfädel-, Ausfädel- und Verflechtungsmanöver. In diesem Zusammenhang sind einerseits die technischen Lösungen, die sich bereits heute mit Assistenzfunktionen wie den Einfädelungsassistenten abzeichnen, in ihrer weiteren Entwicklung insbesondere in Hinsicht auf die Möglichkeiten der maschinellen Kooperation vorauszudenken. Andererseits sind Lösungsansätze für die baulichen und regulatorischen Anpassungen der Verkehrsanlagen zu entwickeln.

So erscheint beispielsweise ein Szenario interessant, in dem der autonome Verkehr zwischen den Anschlussstellen der Autobahnen auf separaten Fahrstreifen geführt und

im Knotenpunktbereich die Separierung aufgehoben wird. Im Knotenpunktbereich treten damit autonome und von Menschen gesteuerte Fahrzeuge auf allen Fahrstreifen auf und können jeweils alle Fahrmanöver (autonom, hoch unterstützt oder durch Menschen gesteuert) bei einer möglicherweise vorgegebenen niedrigen Geschwindigkeit durchführen.

2. Innerorts werden insbesondere noch Fragen des Einflusses der sogenannten bedingten Verträglichkeit zu klären sein. Bedingte Verträglichkeit tritt dann auf, wenn sich kreuzende Verkehrsströme an Lichtsignalanlagen gleichzeitig freigegeben werden und Vorfahrtsregeln eingehalten werden müssen. Dies ist z. B. der Fall bei rechts- oder linksabbiegenden Fahrzeugströmen, die dem parallel geführten Fußgänger- und Radverkehr Vorrang einräumen müssen. Verschiedenste Lösungsansätze könnten hierfür interessant sein und sollten einer genaueren Überprüfung unterzogen werden. So könnte man alle Fahrstreifen der autonomen Fahrzeuge gleichzeitig in einer eigenen Phase freigeben – die Fahrmanöver der feindlichen Ströme im Knotenpunktbereich würden von den autonomen Fahrzeugen selbstständig ausgehandelt werden. Alle anderen Verkehrsteilnehmer würden mit der bereits bestehenden Signalisierung behandelt werden. Eine andere Lösungsmöglichkeit wäre die Berücksichtigung der Radfahrer und Fußgänger in einer eigenen Phase mit „Rundumgrün“ bei gleichzeitiger Vermeidung von bedingt verträglichen Kfz-Strömen durch eine geeignete Phasenstruktur.

16.4.3 Kooperation

Für Szenarien wie das zuletzt angesprochene des sich selbst organisierenden kreuzenden Verkehrs benötigen autonome Fahrzeuge die Fähigkeit der Kommunikation untereinander und mit der Infrastruktur. Die Antizipation von Manövern von vorausfahrenden Fahrzeugen und die davon abhängenden Reaktionen in der darauffolgenden Kolonne wirken sich auf komfortable und damit akzeptable Beschleunigungswerte und ein komfortables Fahrgefühl aus. Deshalb wird den bereits heute entwickelten Technologien zur Kommunikation und Kooperation bei der Entwicklung des autonomen Fahrens eine wichtige Rolle zukommen.

Literatur

1. Brilon, W. ; Regler, M., Geistefeldt, J (2005): Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen. Straßenverkehrstechnik, Heft 3 (Teil 1) und Heft 4 (Teil 2)
2. Friedrich, B.; Kemper, C. (2006): Akzeptanz von Harmonisierungsmaßnahmen im Zuge von Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Schlussbericht für die Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, November 2006, Hannover
3. FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), S. 3–19

4. FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2014): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) – Entwurf der Neufassung
5. Greenshields, B.D. (1935): A study of highway capacity. Proceedings Highway Research Record, Washington Volume 14, pp. 448–477
6. Hall, F. L.; Agyemang-Duah, K. (1991): Freeway capacity drop and the definition of capacity. Transportation Research Record 1320, TRB, National Research Council, Washington D.C.
7. Janiszewski, H.; Jagow, J.; Burmann, M. (2005): Straßenverkehrsrecht. Beck Juristischer Verlag, München
8. Koshi, M.; Iwasaki, M.; Ohkura, I. (1981): Some findings and an overview on vehicular flow characteristics. Proc. 8th Int. Symposium on Transportation and Traffic Theory, Ed. Hurdle, Hauer, Steward, Toronto
9. May, A.D.; Keller, H. (1968): Evaluation of single- and two-regime traffic flow models. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1968, Heft 86, S. 37–47
10. Ponzlet, M. (1996): Dynamik der Leistungsfähigkeiten von Autobahnen, Heft 16 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum
11. Wagner, P. (2014 b): Private Mitteilung

Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: 17

Erkenntnisse aus der Unfallforschung

Thomas Winkle

Inhaltsverzeichnis

17.1 Einleitung	352
17.1.1 Motivation	352
17.1.2 Kategorisierungen von Automatisierungsgraden der Fahrzeugführung	353
17.2 Unfalldatensammlungen zur Darstellung von Sicherheitspotenzialen	354
17.2.1 Amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik in Deutschland	354
17.2.2 German In-Depth Accident Study (GIDAS)	355
17.2.3 Straßenverkehrsunfallstatistik in den USA	355
17.2.4 Verkehrsunfalldaten in Asien am Beispiel China und Indien	356
17.2.5 Internationale Sammlung von Verkehrsunfalldaten	356
17.2.6 Unfalldatensammlungen der Automobilhersteller	356
17.2.7 Unfalldaten des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft	357
17.2.8 Unfalldatensammlungen von Verbraucherverbänden (ADAC)	358
17.3 Grundlagen zur Unfalldatenauswertung	358
17.3.1 Erhebungstiefe versus Fallzahlen	358
17.3.2 Aussagekraft von Wirkfeldern im Vergleich zu Effektivfeldern	359
17.3.3 Sicherheitspotenzial in Abhängigkeit von Automatisierungs- und Wirkungsgrad	359
17.4 Aussagekraft möglicher Prognosen auf der Basis von Unfalldaten	360
17.4.1 A-posteriori-Analysen von Unfalldaten zu „driver only“/„no automation“	361
17.4.2 A-priori-Prognosen zu assistiertem und teilautomatisiertem Fahren	362
17.4.3 Sicherheitspotenzial von hoch- und vollautomatisiertem Fahren	366

T. Winkle (✉)

Technische Universität München – TUM, Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, Deutschland
winkle@carforensic.com

17.5 Sicherheitspotenzial versus Risiken zunehmender Automatisierung	368
17.5.1 Menschliche und technische Fehler bei Vollautomatisierung	368
17.5.2 Sicherheitspotenzial – Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine	369
17.5.3 Sicherheitspotenzial vollautomatisierter Fahrzeuge bei unabwendbaren Ereignissen	372
17.6 Fazit und Ausblick	372
Literatur	374

17.1 Einleitung

Die fortschreitende Automatisierung von Fahrzeugen verspricht neue Möglichkeiten, die zukünftigen gesellschaftlichen Anforderungen an die Mobilität besser zu erfüllen. In Teilbereichen werden neue erweiterte Konzepte für die Interaktion mit Maschinen [1] entstehen. Voraussetzung dafür ist die technische Weiterentwicklung von Assistenzsystemen mit leistungsfähigeren Sensor- und Informationstechnologien, die eine kontinuierliche Automatisierung von Fahraufgaben in der Fahrzeugführung bis hin zu selbstfahrenden Fahrzeugen möglich machen [2].

17.1.1 Motivation

Im Sinne der fortschreitenden Automatisierung bieten Automobilhersteller bereits seit der Jahrtausendwende aktiv lenkende Assistenzsysteme (Active Lane Keeping Assistance Systems – LKAS) in Kombination mit einem Abstandsregeltempomaten für Serienfahrzeuge an. Die kombinierte Funktionalität stand beispielsweise am japanischen Markt für die Rechtslenkerfahrzeuge Nissan Cima (2001) und Honda Inspire (2003) zur Verfügung. Bei der Nutzung beider Assistenten war ein kurzzeitiges teilautomatisiertes Fahren (s. Abschnitt 17.1.2) bis zu 20 Sekunden unter Aufsicht des Fahrers möglich (Testfahrten des Verfassers im Jahr 2003). Seit 2008 verkaufen auch deutsche Hersteller, beginnend mit dem VW Passat CC, aktive Lenkassistenten optional in ausgewählten Modellen [3].

Die Chancen für mehr Verkehrssicherheit steigen durch eine zunehmende Automatisierung von Fahrzeugen. Eine weitere Marktdurchdringung bereits serienmäßiger sicherheits erhöhender Fahrerassistenzsysteme wird zu einer weiteren Reduktion von Verkehrsunfällen führen (S. 361, Abschnitt 17.4.1).

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes verunglückten im Jahr 2013 bei Verkehrsunfällen in Deutschland 3339 Menschen tödlich [4]. Somit verlieren allein im deutschen Straßenverkehr durchschnittlich neun Menschen pro Tag ihr Leben. Darunter sind Unfälle, die künftig durch automatisierte Fahrzeuge vermeidbar wären. Aus Unfalldaten kann ein Sicherheitspotenzial abgeleitet werden. Die in diesem Beitrag genannten Beispiele zeigen Möglichkeiten und Grenzen der Auswertung von Unfalldaten auf. Mit einem Sicher-

heitspotenzial ist hier die prognostizierte Verringerung von Unfallschäden gemeint. Voraussetzungen für die Bestimmung eines konkreten Potenzials sind Grundannahmen zur gesamten Verkehrssituation sowie zum Anteil automatisierter Fahrleistung mit entsprechenden Funktionsgrenzen.

Verkehrsunfallforschung betreiben weltweit unterschiedliche Organisationen. Sie umfasst die Teilbereiche Unfall-Erhebung/-Statistik, Unfall-Rekonstruktion und Unfall-Analyse [5]. Grundlage für die Unfallforschung in Deutschland bildet die von der Polizei in allen Bundesländern geleistete örtliche Unfalluntersuchung. Darüber hinaus betreiben u. a. die VUFO (Verkehrsunfallforschung) der TU Dresden GmbH, die Medizinische Hochschule Hannover, Fahrzeughersteller und Institutionen wie die deutsche Versicherungswirtschaft eine eigene Unfallforschung. Dabei werden Verkehrsunfälle vorrangig direkt vor Ort untersucht, nach bestimmten Merkmalen statistisch erfasst, ausgewertet und bei Bedarf für die Weiterentwicklung zukünftiger Fahrzeugautomatisierung genutzt. Die nachfolgende Ausarbeitung zeigt beispielhaft Möglichkeiten und Grenzen der Erkenntnisse und Prognosen aus Unfalldatensammlungen im Hinblick auf das Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge.

Folgende Fragen werden anhand konkreter Beispiele aus der Unfallforschung erörtert:

- Welche Bedeutung haben Auswertungen und Erkenntnisse aus der Verkehrsunfallforschung für die Einführung automatisierter Fahrzeuge?
- Wie lässt sich das Sicherheitspotenzial durch automatisierte Fahrzeuge nachweisen?

17.1.2 Kategorisierungen von Automatisierungsgraden der Fahrzeugführung

Im Folgenden werden drei Kategorisierungen zur Strukturierung von Automatisierungsgraden (bezogen auf die Fahrzeugführung) vorgestellt, die zur beispielhaften Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen von Unfalldatenanalysen dienen. Für die anschließenden Ausführungen ist die 2012 veröffentlichte Einteilung der BASt-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ [6] ausreichend. Die verwendeten fünf Grade der Automatisierung beginnen bei der ursprünglich konventionellen Fahrzeugführung mit der Bezeichnung „driver only“ wobei der Fahrer permanent die Längs- und die Querführung ausführt. Weitere Einstufungen setzen sich mit der „Fahrerassistenz“ (assistiert) und der „Teilautomatisierung“ fort, wobei der Fahrer auch letztere noch vollumfänglich und kontinuierlich zu überwachen hat. Abschließend ermöglichen die Stufen „Hochautomatisierung“ und „Vollautomatisierung“ teilweise oder andauernd ein Ausbleiben der menschlichen Überwachung bei der Fahrzeugführung [6]. Nachfolgend hat die amerikanische Behörde NHTSA fünf gleiche Stufen definiert [7]. Darauf aufbauend nahm das International On-Road Automated Vehicle Standards Committee der Society of Automotive Engineers (SAE) im Report J 3016 eine weitere Unterscheidung mit sechs Ebenen vor. Mit dieser Unterteilung arbeiten heute vermehrt Forschungsgruppen. Sie dif-

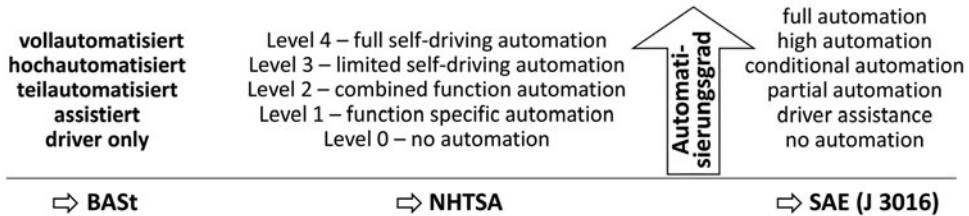


Abb. 17.1 Kategorien der Automatisierung nach BAST / NHTSA / SAE

ferenziert fahrerloses Fahren unter begrenzten Einsatzbedingungen sowie die Fähigkeit und Verantwortung einer vollständigen Übernahme von Fahraufgaben bei einer Vollautomatisierung [8], (s. Abb. 17.1).

17.2 Unfalldatensammlungen zur Darstellung von Sicherheitspotenzialen

Laut Unfallstatistik ereignet sich ein tödlicher Verkehrsunfall im Durchschnitt

- alle 2,7 Stunden in Deutschland,
- alle 25 Minuten (ca. 34.000 jährlich) in den USA und
- alle 26 Sekunden (mindestens 1.240.000 jährlich) weltweit [4, 9, 10].

Maßnahmen im Straßenbau, in der Gesetzgebung, der Rettungskette, der Notfallmedizin sowie der passiven und aktiven Sicherheit von Fahrzeugen haben die Verletzten- und Unfalldatenzahlen seit Anfang der 1970er-Jahre in den westlichen Ländern deutlich gesenkt. Grundlage für diese Erkenntnis bilden großräumige Erhebungen und Analysen von Verkehrsunfällen. Weltweit werden dafür Unfalldaten mit unterschiedlichen Ausrichtungen, Datenmengen und Erhebungstiefen gesammelt. Einige ausgewählte Unfalldatensammlungen, die Aussagen zum Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge ermöglichen, werden im Folgenden mit entsprechenden Vor- und Nachteilen vorgestellt.

17.2.1 Amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik in Deutschland

Auf Basis von §1 des Straßenverkehrsunfallstatistikgesetzes von 1990 veröffentlicht das Statistische Bundesamt in Wiesbaden monatlich eine Bundesstatistik über Getötete, Verletzte und Sachschäden. Alle Polizeidienststellen sind verpflichtet, aufgenommene Unfälle zu melden und begrenzte Informationen aus den Verkehrsunfallanzeigen über die statistischen Landesämter weiterzuleiten [4].

Regelmäßig werden diese bundesweiten Daten im Internet veröffentlicht. Die polizeilich festgestellte Unfallursache, die im Wesentlichen Fahrfehler der Fahrer bewertet, zeigt das

Potenzial für automatisiertes Fahren (S. 361, Abschnitt 17.4.1.1). Alle dokumentierten Informationen sind übersichtlich in Kategorien unterteilt, wie beispielsweise Straßenart, Alter der Beteiligten bzw. Unfallverursacher und Art der Verkehrsmittel. Nicht verfügbar sind spezifische Dokumentationen zu Unfallrekonstruktion, Verletzten und Fahrzeugdetails.

17.2.2 German In-Depth Accident Study (GIDAS)

Zur detaillierten und gleichzeitig statistisch abgesicherten Auswertung von Verkehrsunfallszenarien sind umfangreiche Daten notwendig. In Deutschland eignet sich hierfür die Datenbank der GIDAS (German In-Depth Accident Study). Sie gilt als eine der umfangreichsten und aussagekräftigsten Unfalldatenbanken der Welt und ist national wie international anerkannt [5, 11]. Die vertieften (In-Depth) Analysen am Unfallort erfolgen nach Auftreten eines Personenschadens fahrzeugübergreifend und werden in Deutschland seit 1973 von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und seit 1999 auch von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) unterstützt. Im GIDAS-Projekt werden in den Erhebungsgebieten Hannover (seit 1973) und Dresden (seit 1999) heute jährlich etwa 2000 Unfälle mit bis zu jeweils 3000 codierten Parametern anonymisiert in einer eigenen Unfalldatenbank abgelegt. Jeder dokumentierte Unfall enthält Angaben über die Umwelt (z. B. Wetter, Straßenart, Straßenzustand, Bebauung), die Situation (z. B. Verkehrslage, Konfliktsituation, Unfalltyp, Unfallart), die Fahrzeuge (Typ, Sicherheitsausstattung) sowie Personen- und Verletzungsdaten inklusive einer Unfallskizze mit Rekonstruktion und Bilddaten [5, 11, 12].

Die Vorteile der GIDAS-Daten gründen auf fahrzeugübergreifenden vertieften Analysen am Fahrzeug, an der Unfallstelle und im medizinischen Bereich. Viele Fälle sind für weitere Auswertungen detailliert elektronisch mit der Simulationsoftware PC-Crash der Firma DSD Datentechnik aus Österreich rekonstruiert und simuliert worden [13]. Ein Nachteil besteht darin, dass die Daten nur projektbeteiligten Automobilherstellern und Zulieferern zugänglich sind. Die Aufnahmekriterien schließen nur Unfälle mit Verletzten ein. Obwohl die Erhebung ausschließlich im Umkreis Hannover und Dresden erfolgt, lassen sich die Ergebnisse über eine Hochrechnung (in Fachkreisen: Wichtung bzw. Abgleich mit der amtlichen Unfallstatistik, s. Abschnitt 17.2.1) auf Gesamtdeutschland übertragen.

17.2.3 Straßenverkehrsunfallstatistik in den USA

In den USA dokumentiert die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) über das Fatality Analysis Reporting System (FARS) seit 1975 jeden tödlichen Verkehrsunfall einheitlich [9]. Weiterhin existiert in den USA seit 1979 das National Automotive Sample System – Crashworthiness Data System (Nass-CDS) [14]. Ähnlich dem deutschen GIDAS-Projekt erheben interdisziplinäre Teams Verkehrsunfälle mit Personen- oder schweren Sachschäden.

Auch in den USA sind weitere Datensammlungen zur vertieften Unfallanalyse verfügbar, jedoch liefern sie im Vergleich zu GIDAS keine verlässliche Unfallrekonstruktion. Beispielsweise ist es nicht möglich, Notbremsfunktionen zu bewerten [11]. Die Unfallrisiken in den USA unterscheiden sich beispielsweise von den deutschen, aufgrund der längeren Fahrdistanzen. Der Rückgang der US-Verkehrsunfalltotenzahl seit 1970 fällt mit ca. 16 Prozent geringer aus als in Deutschland mit ca. 60 Prozent [4, 9].

17.2.4 Verkehrsunfalldaten in Asien am Beispiel China und Indien

Die Sammlung von Verkehrsunfalldaten in Asien befindet sich in den Anfängen. Die Analysen sind oberflächlich und enthalten keine verlässliche Rekonstruktion. Während in China erste Ansätze für verlässliche Datensammlungen bestehen, wird in Indien nicht einmal die Anzahl der Verkehrsunfalltoten erhoben [11].

17.2.5 Internationale Sammlung von Verkehrsunfalldaten

Die International Road Traffic and Accident Database (IRTAD) besteht aus einer Sammlung verschiedener nationaler amtlicher Unfallstatistiken. Sie beinhaltet Verkehrsunfälle mit Personenschäden allgemein sowie Getötete nach Alter, Ortslage und Verkehrsbeteiligung und wird von der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) in Paris gepflegt. Neben den an Deutschland angrenzenden Ländern sind Unfalldaten enthalten von: Australien, Finnland, Griechenland, Großbritannien, Irland, Island, Israel, Italien, Japan, Kanada, Luxemburg, Neuseeland, Norwegen, Portugal, Schweden, Slowenien, Spanien, Südkorea, Ungarn und den USA [10].

Die Daten sind öffentlich im Internet zugänglich und eignen sich besonders für den Vergleich der enthaltenen Länderdaten. Es ist möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Regularien und des kollektiven Fahrverhaltens (beispielsweise Nord versus Süd) zu studieren. Jedoch fehlen vertiefende Informationen zum Unfallhergang. Außerdem unterscheiden sich Erhebungsmethoden und Datenmengen von Land zu Land.

17.2.6 Unfalldatensammlungen der Automobilhersteller

Um Erkenntnisse zum Unfallgeschehen aktueller Fahrzeuge zu sammeln und die Produktbeobachtungspflicht zu erfüllen, führen heute interdisziplinäre Expertenteams von Automobilherstellern und Zulieferern, gemeinsam mit Krankenhäusern und der Polizei, Unfallanalysen vor Ort durch. Mit diesen Ergebnissen lässt sich die Wirksamkeit aktuell eingeführter Fahrzeugsicherheitssysteme fortlaufend verbessern.

Außerdem dient die Analyse von Unfallereignissen durch den Hersteller der Einhaltung vorgeschriebener Pflichten und der Beobachtung möglicher Produktgefahren, die durch die

Nutzung entstehen können. Nach § 823 des Bürgerlichen Gesetzbuchs (BGB) haftet ein Automobilhersteller für Folgeschäden seiner Produkte, die im Rahmen des bestimmungsgemäßen oder vorhersehbaren Gebrauchs durch den Fahrer oder sonstige Personen durch einen Fehler auftreten. Deshalb muss ein Automobilhersteller Informationen über die Verwendung von Fahrzeugen und innovativen Systemen sammeln und analysieren. Je gefährlicher ein Produkt ist, desto höher sind die Schutzpflichten, das Produkt im Entwicklungsprozess abzusichern und darüber hinaus zu beobachten [15], (s. Kap. 21, 23, 28).

Unter den Automobilherstellern begann Mercedes-Benz bereits Ende der 1960er-Jahre, gemeinsam mit der Polizei im Landkreis Böblingen, Verkehrsunfälle unter Beteiligung von Mercedes-Fahrzeugen zu untersuchen. Zwei Jahre später konnte die Mercedes-Unfallforschung mit Erlaubnis des Ministeriums auf regelmäßige telefonische Informationen und Einsicht in die Unfallakten der Polizei in Baden-Württemberg zurückgreifen. Spätestens seit den 1970er-Jahren begannen auch andere Hersteller wie BMW im größeren Rahmen Kollisionen mit Beteiligung eigener Fahrzeuge zu untersuchen und zu speichern. Volkswagen begann Ende der 1960er-Jahre eine Zusammenarbeit mit dem Haftpflicht-, Unfall-, Kraftversicherer-Verband (HUK-Verband) und seit 1985 mit der Medizinischen Hochschule Hannover MHH (GIDAS-Vorläufer). Auch der Volkswagen-Konzern erhebt seit 1995 eigene Daten [11].

Interdisziplinäre vertiefte Unfallanalysen der Automobilhersteller unter Beteiligung neuer Fahrzeugtypen mit aktueller Sicherheitstechnik und insbesondere die Einbindung von Funktionsentwicklern ermöglichen nachvollziehbare Potenzialaussagen zu Fahrerassistenzsystemen. Allerdings ist die begrenzte Anzahl von ungefähr 100 Fällen pro Jahr, ausschließlich mit Beteiligung der eigenen Fahrzeugmarke, von ihrer statistischen Aussagekraft her nicht mit GIDAS-Daten vergleichbar.

17.2.7 Unfalldaten des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft

Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV), Nachfolgeorganisation des HUK-Verbandes, verfügt über dokumentierte Informationen des Schadensgeschehens aus Kraftfahrtschäden deutscher Versicherer, wenn auf Basis vertraglicher Zusagen Schadenersatz geleistet wurde. Diese Daten nutzt der GDV beispielsweise zur Einstufung von Versicherungsverträgen oder auch zur Ermittlung des Sicherheitspotenzials von Fahrerassistenzsystemen [16].

Die Unfallforschung der Versicherer hat Zugriff auf alle dem GDV gemeldeten Kraftfahrzeug-Haftpflicht-Schadensfälle. Leider sind die Daten nicht öffentlich zugänglich. Die Durchführung von Unfallanalysen erfolgt nicht direkt vor Ort, und die Unfallaufnahmekriterien sind nicht einheitlich. Außerdem endet das Interesse einer Versicherung an Einzelheiten eines Falles, wenn feststeht, dass sie zahlungspflichtig ist. Daher existieren bei unumstrittenen Fällen nur wenig detaillierte Daten zur Ursache. Bei Allein-Unfällen mit nur einem Beteiligten – wie beispielsweise bei sogenannten Fahrnfällen,

wenn der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug verliert – sind meist keine Daten zur Ursache verfügbar [11].

17.2.8 Unfalldatensammlungen von Verbraucherverbänden (ADAC)

Die ADAC-Unfallforschung wird seit 2005 aufgebaut. Sie besteht aus einer Kooperation zwischen der ADAC-Luftrettung und dem ADAC-Technikzentrum. Aus den Rettungsflügen werden bislang jährlich bundesweit Informationen über ca. 2500 schwere Unfälle in der ADAC-Unfalldatenbank gesammelt. Die Unfalldaten stammen von Polizei, Ärzten, Feuerwehren und Kfz-Sachverständigen [17].

ADAC-Unfalldaten beinhalten Informationen zu Verkehrsunfällen mit Schwerverletzten. Darunter sind Luftbilder mit den Endlagen der Fahrzeuge und eine detaillierte medizinische Diagnostik. Auf Aktenbasis besteht die Möglichkeit für ergänzende Einzelauswertungen. Jedoch sind die Daten nicht öffentlich zugänglich. Es erfolgt keine abschließende interdisziplinäre Reflektion mit den jeweiligen unfallaufnehmenden Personen.

17.3 Grundlagen zur Unfalldatenauswertung

17.3.1 Erhebungstiefe versus Fallzahlen

Die Aussagekraft von Unfalldaten in Bezug auf Sicherheitspotenziale variiert deutlich, da die Daten unterschiedlich erhoben werden. Sogenannte *In-Depth*-Erhebungen werden meist in Zusammenarbeit mit qualifizierten interdisziplinären Teams durchgeführt. Besonders fundierte Ergebnisse sind durch gemeinsame Einzelfallanalysen von Funktionsentwicklern, Sachverständigen für Unfallanalyse, Medizinern und Verkehrspsychologen erreichbar. Bei einer derartigen Erhebungstiefe bestehen allerdings meist Einschränkungen aufgrund geringerer Fallzahlen, sodass die statistische Aussagekraft oft gering ist.

Auswertungen von Unfalldatenbanken erlauben Rückschlüsse auf Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Die detaillierte Unfallanalyse inklusive Unfallrekonstruktion umfasst sowohl die Rückrechnung von Geschwindigkeiten mithilfe der Unfallspuren als auch die Untersuchung der Unfallentstehung, Betrugsaufklärung sowie Betrachtungen zur Vermeidbarkeit und Biomechanik. Eine darauf basierende Potenzialbewertung zukünftiger Systeme setzt jedoch die umfangreiche Kenntnis vorgegebener Rahmenbedingungen voraus.

Bislang entstanden zukunftsweisende Ideen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit vor allem durch die Kombination von Unfallanalysen, bestehenden Erfahrungen und umfassenden Forschungstätigkeiten. Unfallforschung ist eine Möglichkeit, die Effizienz bestehender und den Bedarf an neuen automatisierten Fahrzeugfunktionen zur Erhöhung der Sicherheit zu ermitteln. Im Weiteren werden Grundbegriffe zur Unfalldatenauswertung erklärt.

17.3.2 Aussagekraft von Wirkfeldern im Vergleich zu Effektivfeldern

Beim Vergleich verschiedener Unfalldatenanalysen ist die Art der Datengewinnung und die Art der Datenverarbeitung zu unterscheiden. Oft werden jedoch unter optimalen Bedingungen angenommene Wirkfelder mit Effektivfeldern unter realen Bedingungen vermischt.

Ein Wirkfeld (*area of action*) umfasst die Unfälle, auf die ein System Einfluss haben kann. Das Wirkfeld kann je nach Präzisierung der Spezifikation eines Systems unterschiedlich ausfallen. Im Ergebnis stellt es eine erste Abschätzung für ein maximal erreichbares Potenzial der betrachteten Automatisierungsstufe dar. Dagegen ist die tatsächlich resultierende Effizienz einer Funktion in der Regel deutlich geringer. Bei der Effizienz handelt es sich um die Wirkung, die ein spezifiziertes System tatsächlich hat. Sie wird entweder am Unfallgeschehen nachgewiesen (*a posteriori*) oder durch eine Simulation vorhergesagt (*a priori*).

Die Ermittlung eines Effektivfeldes (*area of efficiency*) erfordert somit eine genaue Kenntnis über:

- die Systemspezifikation mit entsprechenden Funktionsgrenzen und
- das Verhalten des Fahrers.

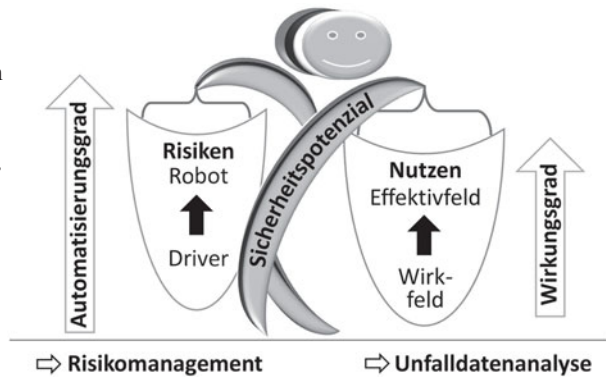
Der Wirkgrad (*degree of efficiency*) hingegen beschreibt den prozentualen Anteil, der die relative Effizienz einer Funktion zum Ausdruck bringt und immer von dem nicht eindeutigen Begriff des Wirkfelds abhängig ist [18]:

$$\text{Wirkgrad} = \frac{\text{Effektivfeld}}{\text{Wirkfeld}} = x [\%] \quad (17.1)$$

17.3.3 Sicherheitspotenzial in Abhängigkeit von Automatisierungs- und Wirkungsgrad

Einige Potenzialanalysen zum Sicherheitseinfluss auf der Basis von Unfalldatenbanken betrachten das oben beschriebene, maximal anzunehmende Wirkfeld. Dagegen kommen Wirkgradanalysen der Realität näher, denn sie schätzen ein Effektivfeld für den tatsächlichen Nutzen ein [18]. Der resultierende Sicherheitsnutzen automatisierter Fahrzeuge ergibt sich allerdings erst, nachdem alle Risiken berücksichtigt wurden. Der Nutzen entspricht der Verminderung der Unfallhäufigkeiten bzw. Unfallschwere. Neue Risiken bestehen im Hinblick auf bislang nicht existierende Unfälle, die mit einer zunehmenden Automatisierung entstehen können.

Abb. 17.2 Verbraucher bewerten das Sicherheitspotenzial subjektiv, indem sie wahrgenommene Risiken und den Nutzen kontextbezogen gegeneinander abwägen. Risiken hängen vom Automatisierungsgrad, der Nutzen vom Wirkungsgrad ab. Unfalldatenanalysen sowie Risikomanagement (s. Kap. 28) ermöglichen Objektivierung (s. Kap. 30) und Optimierung



Die *Theorie der erfinderischen Problemlösung* (TRIZ) definiert die Anforderungen einer idealen Maschine über die Formel für das *Ideale Endresultat* mit einem unbegrenzten Nutzen ohne Kosten und Schäden [19]:

$$\text{Ideales Endresultat} = \frac{\sum \text{Nutzen}}{(\sum \text{Kosten} + \sum \text{Schäden})} = \frac{\infty}{(0+0)} = \infty \quad (17.2)$$

Betrachtet man einerseits den tatsächlichen Gesamtnutzen im Hinblick auf das verbraucherrelevante Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge, so steigt dieser entsprechend dem Wirkungsgrad bis zum maximalen „Effektivfeld“ an (Nachweis über Unfalldatenanalyse und Funktionskenntnis). Andererseits können die Risiken in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad („Driver“ versus „Robot“) ansteigen. Diese reduzieren wiederum den tatsächlichen Nutzen für die Sicherheit (s. Abb. 17.2). Zur Minimierung möglicher Risiken erfolgt vonseiten des Herstellers ein Risikomanagement (s. Kap. 28) unter Einbeziehung von Unfalldaten.

17.4 Aussagekraft möglicher Prognosen auf der Basis von Unfalldaten

Die nachfolgende Metaanalyse zeigt an Beispielen Möglichkeiten und Grenzen von Potenzilaussagen auf Basis verschiedener Unfalldaten. Da bislang keine Erfahrungen zur Analyse hoch- bzw. vollautomatisierter Fahrzeuge existieren, werden zunächst Fahrzeugsysteme ohne Automatisierung („driver only“/„no automation“) sowie mit geringeren Automatisierungsgraden bezüglich der Hauptfahraufgaben („assistiert“/„teilautomatisiert“) betrachtet, gegliedert nach A-posteriori- und A-priori-Analysen.

Abschnitt 17.4.1 beschreibt Beispiele für A-posteriori-Aussagen zu bislang erfassten Unfalldaten. In der hier genutzten Definition können „aus der Erfahrung gewonnene“ [20] Zahlen direkt für Interpretationen genutzt werden. Im Gegensatz dazu werden die in Ab-

schnitt 17.4.2 definierten A-priori-Prognosen auf der Basis von Unfalldatensammlungen für ein mögliches Potenzial zukünftiger Automatisierungsgrade ausschließlich mithilfe von Annahmen „durch logisches Schließen gewonnen“ [20].

17.4.1 A-posteriori-Analysen von Unfalldaten zu „driver only“/ „no automation“

A-posteriori-Analysen von Unfalldaten aus der Vergangenheit und Gegenwart mit konventionell vom Fahrer gesteuerten Fahrzeugen bilden die Grundlage für direkte Erkenntnisse zu Unfallschwerpunkten und Veränderungen im realen Unfallgeschehen. In der Kategorie „driver only“/„no automation“ erfolgen weder Warnungen noch Eingriffe in die Längs- oder Querverführung auf der Basis von Umgebungssensoren.

Zur Verdeutlichung dienen ein Beispiel zur Veränderung der Unfalldaten (s. Abschnitt 17.4.1.1) sowie ein weiteres zum Einfluss der Fahrdynamikregelung Electronic Stability Control – ESC (s. Abschnitt 17.4.1.2).

17.4.1.1 Verkehrsstatistik: Unfalltote versus zulassungspflichtige Fahrzeuge

Anhand der bisher gesammelten Unfalldaten des statistischen Bundesamtes lässt sich beispielsweise das Verhältnis der Verkehrsunfalltoten zu den zugelassenen Fahrzeugen darstellen. Es zeichnet sich in Deutschland – seit der dramatischen Anzahl von 21.332 Verkehrsunfalltoten im Jahr 1970 auf 3368 für das Jahr 2014 – eine fallende Tendenz ab [4].

Die Unfalldaten zeigen: Die Anzahl der Verkehrsunfalltoten ließ sich im Jahr 1970 mit über 21.000 auf jährlich annähernd 3000 – bei gleichzeitiger Zunahme zugelassener Fahrzeuge – senken. Die Ursachen dafür liegen im Bereich unterschiedlicher gesetzlicher, technischer, medizinischer und infrastruktureller Maßnahmen (s. Abb. 17.3). Die Überlagerung aller Sicherheitsvorkehrungen erschwert den Nachweis einzelner Potenziale.

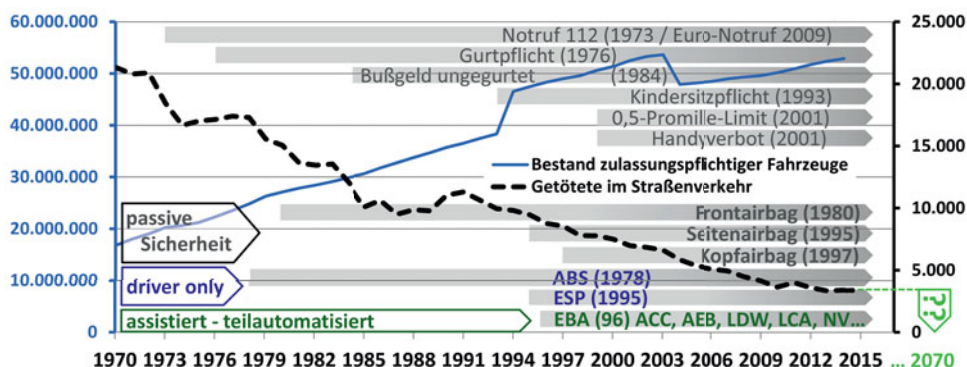


Abb. 17.3 Rückgang der Verkehrstoten durch sicherheitserhöhende Maßnahmen trotz Zunahme der Anzahl zugelassener Fahrzeuge in Deutschland

17.4.1.2 Studien zur Wirkung von „driver only“/„no automation“

Das seit 1995 eingeführte ESC-System baut technisch auf dem seit 1978 eingeführten ABS (Antiblockiersystem) auf. Es nutzt dessen Raddrehzahlsensoren mit zusätzlichen Sensoren für die Gieraten-, Lenkradwinkel und Querbeschleunigung. Die Informationen aus diesen Sensoren versuchen das Fahrzeug bei erkanntem Schleudern durch selbstständiges Anbremsen einzelner Räder zu stabilisieren. Durch diese Bremseingriffe kann ESC einen Seitenaufprall in einen weniger verletzungsgefährdenden Frontalaufprall umwandeln. Die Daimler-Unfallforschung ging 2001 davon aus, dass der Anteil von Schleuderunfällen mit verletzten Personen 21 Prozent und bei Unfällen mit tödlichem Ausgang 43 Prozent beträgt [21]. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend erfolgten bereits einige Jahre nach der ESC-Einführung Einzelfallanalysen von Fahrdynamikunfällen. Die damaligen Ergebnisse aus Einzelfalluntersuchungen von Experten der Unfallforschungen seitens der Fahrzeughersteller klappten sehr weit auseinander. Auch spätere Potenzialaussagen auf der Basis größerer Datenmengen unterschieden sich. So weisen Wirkfelder aus dem Jahr 2000 einen positiven Einfluss bei schwerwiegenden Schleuderunfällen von bis zu 67 Prozent aus [22]. Andere Studien belegen: Das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESC/ESP) in der Kategorie „driver only“ ist nach der Einführung des Sicherheitsgurtes die zweitwirksamste Sicherheitserhöhung für Fahrzeuge [2]. So verringerte sich der Anteil der Fahrunfälle bzw. Schleuderunfälle seit der serienmäßigen Einführung der Fahrdynamikregelung beispielsweise in allen Mercedes-Benz-Pkw im Zeitraum 2002/2003 von 20,7 Prozent auf 12 Prozent [22]. Die hohe Effektivität von ESC ließ sich auch bei anderen Marken, wie beispielsweise Volkswagen, über die Unfallstatistik durch eine geringere Unfallohäufigkeit und die Vermeidung besonders kritischer Unfalltypen nachweisen [23].

Fazit: Bei sicherheitserhöhenden „driver only“-Funktionen mit rascher Marktdurchdringung, wie es insbesondere bei ESC der Fall war, lässt sich bereits heute abhängig von unterschiedlichen Datenquellen und Annahmen ein Sicherheitsgewinn belegen. Insbesondere bei Fahrdynamikregelungen sind Sicherheitsauswirkungen wissenschaftlich fundiert belegbar.

17.4.2 A-priori-Prognosen zu assistiertem und teilautomatisiertem Fahren

A-priori-Prognosen sind an Hypothesen und Schlussfolgerungen geknüpft. So können assistierte und teilautomatisierte Funktionen den Fahrer durch optische, akustische oder haptische Hinweise bzw. kurze Eingriffe mit Warncharakter vor einer drohenden Gefahr bewahren. Voraussetzung für eine erfolgreiche Gefahrenabwehr ist jedoch die Annahme einer rechtzeitigen und der Verkehrssituation angepassten Reaktion des Fahrers.

Aus technischer Sicht ermöglicht diese fortgeschrittene Automatisierungsstufe – mit erweiterter Computer- und Sensortechnik zur Umfeldwahrnehmung – zunehmend leistungsfähigere Assistenzsysteme. Einige der heute angebotenen sicherheitserhöhenden Fahrerassistenzsysteme warnen bei erkannten Gefahren im Längs- oder Querverkehr. Dazu

zählen beispielsweise Kollisions- (EBA – Electronic Brake Assist, ACC mit FCWS – Adaptive Cruise Control mit Forward Collision Warning System), Fahrstreifenwechsel- (LCA – Lane Keep Assist), Fahrstreifenverlassens- (LDW – Lane Departure Warning), Nachtsicht- (NV – Night Vision) oder Kreuzungsassistent. Andere greifen in die Längs- oder Querdynamik ein, wie der elektronische Bremsassistent (EBA) oder eine automatische Notbremse (ANB/AEB Autonomous Emergency Brake) (s. Abb. 17.3).

17.4.2.1 Studie zum Potenzial von Lane Departure Warning

Eine Vorgehensweise, Verkehrsunfälle gemeinsam mit Ärzten, Psychologen und Entwicklungsingenieuren zu analysieren, wurde 2006 am Beispiel eines Lane-Departure-Warning-Systems (LDW) vorgestellt [24]. Die unter Beteiligung des Verfassers, eines Psychologen und eines Funktionsentwicklers erzielten Ergebnisse beruhten auf einer interdisziplinären Forschungsgemeinschaft zwischen einem Automobilhersteller, einer Universitätsklinik und der Polizei mit Unterstützung durch das Bayerische Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (BStMI).

Derartige interdisziplinäre Ursachen- bzw. Unfallfolgenanalysen umfassen die Betrachtung der technischen, medizinischen und psychologischen Details durch Fachleute des jeweiligen Gebiets mit anschließender gemeinsamer Integration aller Ergebnisse. So werden heute bei einer Verkehrsunfallanalyse vermehrt verkehrspsychologische Unfalldaten erhoben, die das Erleben vor einer Kollision aus der Sicht des Fahrers mithilfe standardisierter Interviews erfassen und bewerten. Der technisch rekonstruierte Unfallhergang wird durch die verkehrspsychologische Sichtweise ergänzt.

In Abstimmung zwischen den Fachteams wurde am Beispiel von Lane Departure Warning dargelegt, welche Voraussetzungen für die Auslegung in der Fahrzeugentwicklung zu treffen sind. Gezielte Fragestellungen aus der technischen Entwicklung filtern die gruppierten Unfälle. Damit lassen sich Aussagen über Unfallvermeidungspotenziale für in der Entwicklung befindliche Systeme treffen. Bedingung ist die Kenntnis der spezifischen technischen Systemgrenzen. Darüber hinaus sind Empfehlungen für weitere Systemerweiterungen möglich [24].

Fazit: Anhand dieser detaillierten Unfallanalysen zeigt sich der Nutzen einer umfassenden Unfalldatenerfassung. Für diese Studie waren Experten für Technik, Medizin und Psychologie eng vernetzt. Diese interdisziplinäre Vorgehensweise liefert zahlreiche zusätzliche Hinweise über Fahrzeugdetails, Unfallstelle, Unfallbeteiligte, Verletzungsmuster und Zeugenaussagen. Die Zusatzinformationen geben Aufschluss über Lenk- und Bremsengriffe sowie Reaktionen unmittelbar vor der Kollision, da bei einem Abkommen von der Fahrbahn menschliche Fehler wie Müdigkeit, Unaufmerksamkeit oder Ablenkung die Hauptursache darstellen. Verschiedene Blickwinkel eines interdisziplinären Teams ermöglichen eine realitätsnahe Rekonstruktion und computergestützte Simulation des Unfallgeschehens. Um daraus repräsentative Ergebnisse zu ermitteln, ist jedoch ein Abgleich mit größeren Unfalldatensammlungen notwendig.

17.4.2.2 Interdisziplinäre Wirkgradanalyse zu verfügbaren Fahrerassistenzsystemen

Aufbauend auf den Vorteilen interdisziplinärer Einzelfallbetrachtungen zur Wirkung von Lane Departure Warning im vorangehenden Abschnitt wurde vier Jahre später eine weitere interdisziplinäre Wirkgradanalyse durchgeführt, um das Potenzial bereits in Serie befindlicher sicherheitserhöhender Fahrerassistenzsysteme zu vergleichen. Diese Studie erfolgte anhand einer Stichprobe von rekonstruierten Unfällen ($n = 100$) in enger Absprache mit den jeweiligen Funktionsentwicklern. Die interdisziplinäre Unfalldatenauswertung in Bezug auf die Unfallursache und die situationsabhängige Wirksamkeit der Fahrerassistenzsysteme zur Vermeidung eines Unfalls führte ein Psychologe gemeinsam mit dem Verfasser durch [25]. Zur Untersuchung standen die seit Anfang 2010 angebotenen Seriensysteme Night Vision, Lane Departure Warning, Lane Change Assistant sowie Geschwindigkeits- mit Abstandsregelanlage (Adaptive Cruise Control). Für diesen Wirkgradnachweis erfolgte eine Auswertung von Unfallforschungsdaten, die anhand der Unfallstatistik für Bayern gewichtet wurde. Dabei wurden Realunfälle mit der rekonstruierten Unfallszene abgeglichen und in Bezug auf die Mensch-Maschine-Interaktion der Unfallursache bewertet. Dies erfolgte analog zu den im ADAS Code of Practice für die Entwicklung und sicheren Inverkehrbringung von künftigen Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) mit aktiver Längs- und Querverführung beschriebenen Mensch-Maschine-Interaktionen [26]. Nach mehrjähriger Vorbereitung [27, 28] erfolgte 2009 die Veröffentlichung durch die ACEA [29]. Ausschließlich nach Zustimmung aller Entwicklungsexperten der jeweiligen Systeme kam es zu einer positiven Zuordnung eines Unfallvermeidungspotenzials. Ergebnis: Die untersuchten Systeme reduzierten die Unfallschwere deutlich.

Insgesamt konnte ein positiver Nutzen der untersuchten Fahrerassistenzsysteme durch die Vermeidung von Verkehrsunfällen mit einem Rückgang der Gesamtzahl der verletzten Personen um 27 Prozent prognostiziert werden. Dabei würde sich die Anzahl der Verletzten von ursprünglich 126 Fahrern mit 49 Beifahrern auf 94 Fahrer mit 33 Beifahrern reduzieren. Zu beachten ist, dass die Ergebnisse unter der Annahme optimaler Reaktionen hinsichtlich der Mensch-Maschine-Interaktionen stehen, die für eine Aussage zum Wirkgrad durch eine Probandenstudie zu verifizieren wäre. Weiterhin müsste eine 100-prozentige Verbreitung der Systeme gewährleistet sein, die innerhalb der Systemgrenzen fehlerfrei arbeiten.

Die vorgenommene Verletzungseinstufung erfolgte auf Basis der Abbreviated Injury Scale (AIS) [30], wie sie auch die ISO 26262 für die funktionale Sicherheit nutzt [31]. Diese AIS codiert jede Verletzung am menschlichen Körper mit einem Zahlenwert zwischen 1 (leicht verletzt) und 6 (nicht therapierbar). Dabei definiert sich die schwerste Verletzung aller Einzelverletzungen einer Person als MAIS (Maximum AIS). Eine unverletzte Person erhält die Einstufung MAIS 0.

Bei der weiteren Auswertung der Unfallursachen ergab sich ein Anteil der sogenannten Informationsfehler – also Störungen beim Informationszugang und der Informationsaufnahme – von über 60 Prozent. Daraus erklärt sich die entsprechend große Wirkung der warnenden Assistenzsysteme [25].

Fazit: Erstmalig wurden in einer interdisziplinären Studie aktuell erhältliche Fahrerassistenzsysteme unter Einbeziehung der jeweils beteiligten Entwickler verglichen. Jeder einzelne Entwickler kennt die spezifisch relevanten Funktionsparameter seines Systems und ermöglicht somit treffsichere Potenzialbewertungen. Allerdings ist anzumerken, dass die gewichtete Stichprobe mit 100 Fällen in der Wirkfeldstudie im Vergleich mit den repräsentativen Unfalldaten aus Bayern zu klein ist, um anhand der gewonnenen Ergebnisse eine statistisch belastbare Aussage zu treffen. Dennoch lässt sich aus den Ergebnissen die Tendenz ableiten, dass diese Fahrerassistenzsysteme erheblich zur Verkehrssicherheit beitragen.

Es sei darauf hingewiesen, dass weitere Möglichkeiten zur Erlangung statistischer Aussagen für die Wirkung von Bremsassistenten und die automatische Notbremsfunktion bestehen. Dazu existieren Bewertungsmethoden zur Prognose des Sicherheitsgewinns, die auf Simulationen elektronischer Unfallrekonstruktionen basieren [32].

17.4.2.3 GIDAS-Datenbankanalyse zum Sicherheitspotenzial vernetzter Fahrzeuge

Die folgende GIDAS-Datenbankanalyse (German In-Depth Accident Study) zeigt die Komplexität und Vielfalt verschiedener Annahmen anhand einer größeren Datenmenge. Diese Analyse mit einer aussagefähigeren Stichprobe führte der Verfasser im Jahr 2009 zusammen mit einem Expertenteam im Rahmen des Forschungsprojekts „Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland“ (simTD) durch. Ziel war es, die Effizienz zukünftiger sicherheitsrelevanter Fahrzeugkommunikationssysteme abzuschätzen. Betrachtet wurden Funktionen für vernetzte Systeme mit direktem Sicherheitseinfluss auf den Straßenverkehr. Als Datengrundlage dienten 13.821 von GIDAS dokumentierte Unfälle mit Personenschaden der Jahre 2001 bis 2008 aus den Großräumen Dresden und Hannover [12]. Für die Hochrechnung auf Gesamtdeutschland wurden die nach einem statistischen Stichprobenplan erhaltenen Daten anhand der amtlichen Unfallstatistik des Statistischen Bundesamtes gewichtet. Die amtliche Statistik enthält alle in Deutschland registrierten Unfälle mit Personenschaden während eines Kalenderjahres. So kam es etwa im Jahr 2007 zu 335.845 Verkehrsunfällen mit Personenschaden [4].

Die zur Auswertung notwendigen Variablen wurden in mehreren Absprachen mit den simTD-Funktionsentwicklern und Unfallexperten der Firmen Audi, BMW, Volkswagen, Daimler und Bosch genau definiert. Die Projektteilnehmer einigten sich im ersten Schritt auf die Betrachtung von 13 sicherheitsrelevanten Warnfunktionen. Im Rahmen mehrerer Workshops entschieden die Projektteilnehmer einstimmig, für diese Betrachtung die relevanten Fahrzeuge wie beispielsweise Pkw, Lkw, Busse, landwirtschaftliche Zugmaschinen, Schienenfahrzeuge (mit Straßenbahnen und Stadtbahnen, jedoch keine Fahrzeuge der Deutschen Bahn) und Motorräder (motorisiertes Zweirad, Trike, Quad ab 125 ccm) zu berücksichtigen. Anschließend wurden sehr aufwendige Wirkfeldbestimmungen auf Basis der umfangreichen GIDAS-Daten durchgeführt. Zunächst erfolgte die Selektion anhand der Unfallvariablen aller für das jeweilige System relevanten Unfälle in Bezug auf das gesamte Unfallgeschehen. Im Ergebnis bewegten sich die Anteile der Wirkfelder aus den einzeln untersuchten Funktionen innerhalb einer großen Bandbreite zwischen 0,2 Prozent

und 24,9 Prozent. Dabei gibt das Wirkfeld lediglich eine Abschätzung der maximalen Effizienz an, die mit sehr großer Sicherheit nicht überschritten wird. Zu beachten ist darüber hinaus, dass einzelne Wirkfelder nicht aufsummiert werden dürfen, da zwischen den Funktionen Wirkfeldüberschneidungen auftreten.

In einer darauf folgenden Wirkgradanalyse wurden aus der oben beschriebenen GIDAS-Wirkfeldanalyse drei Funktionsausprägungen (elektronisches Bremslicht, Querverkehrsassistent, Verkehrszeichenassistent für Stoppschilder) ausgewählt und über eine Simulation reduzierter Stichproben aus Fahrsimulatoruntersuchungen entsprechende Wirkgrade angenommen. Für die durch den Fahrer vermiedenen Unfälle bei einem Querverkehrsassistenten (vgl. [33]) ergab sich beispielsweise eine erhebliche Bandbreite von 9,9 bis 73,3 Prozent. Diese resultiert aus den unterschiedlichen Reaktionszeiten der Fahrer und aus den Bremsintensitäten nach Warnungen. Deshalb wurden drei Reaktionszeiten (0,54/0,72/1,06 Sekunden) und die jeweilige Auftretenswahrscheinlichkeit (36/48/16 Prozent) festgelegt. Angenommen wurde bei erfolgloser Reaktion eine schwache Bremsung mit 50 Prozent und bei erfolgreicher Reaktion mit 100 Prozent des maximalen Bremsdrucks [12].

Fazit: Die aufwendige Vorgehensweise dieser Wirkgradanalyse hatte das Ziel, Potenziale zukünftiger vernetzter sicherheitserhöhender Fahrerassistenzfunktionen mit statistischer Relevanz zu ermitteln und zu bewerten. Die ermittelte Bandbreite von bis zu ca. 70 Prozent schmälert jedoch die Aussagekraft und lässt damit lediglich Tendenzen und Aussichten in Bezug auf vermiedene Unfälle zu. Diese starke Streuung liegt in der Sensitivität der oben beschriebenen Parameter und des bewerteten Warn-Algorithmus begründet, denn die Reaktionszeiten und die Bremsintensitäten der Fahrer auf Warnungen weichen in der Praxis stark voneinander ab.

17.4.3 Sicherheitspotenzial von hoch- und vollautomatisiertem Fahren

Aus technischer Sicht können heute automatisierte Fahrzeuge viele Fahraufgaben im Verkehrsgeschehen unter günstigen Bedingungen selbstständig übernehmen. Während Assistenzsysteme den Fahrer unterstützen, übernimmt komplexe Technik beim hoch- bzw. vollautomatisierten Fahren die Fahraufgaben teilweise oder permanent.

Hoch- und vor allem vollautomatisiertes Fahren soll einer „Vision Zero“ näherkommen: Ziel ist es, möglichst unfallfrei mobil zu sein. Straßen und Verkehrsmittel sollen so sicher gestaltet sein, dass keine Menschen getötet oder schwer verletzt werden. Die Vision der Unfallfreiheit hat ihren Ursprung im Arbeitsschutz und wurde in den 1990er-Jahren in Schweden erstmals auf den Straßenverkehr angewendet. Die EU unterstützte Projekte für selbstfahrende Fahrzeuge wie das Forschungsprojekt „Highly automated vehicles for intelligent transport“ (HAVEit), das von der EU mit 17 Millionen Euro gefördert wurde. Auch Automobilhersteller wie Audi, BMW, Daimler und Volkswagen arbeiten an Visionen zum unfallfreien Fahren. In einem Interview erklärt Thomas Weber, Vorstandsmitglied für Forschung und Entwicklung der Daimler AG:

Unser Weg zum unfallfreien Fahren treibt uns an, die Mobilität auch in Zukunft für alle Verkehrsteilnehmer so sicher wie möglich zu gestalten. [21]

Die Anzahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden und einem Pkw als Hauptverursacher ist im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts in Deutschland von 266.885 im Jahr 2001 auf 198.175 im Jahr 2010 zurückgegangen. Laut Statistischem Bundesamt (2010) sind Pkw mit einem Anteil von 68,7 Prozent Hauptverursacher von Verkehrsunfällen. Dabei verteilen sich die Unfalltypen im Schwerpunkt auf die Kategorien Einbiegen/Kreuzen (58.725), Längsverkehr (44.812), Abbiegen (33.649) und 30.737 Fahrurfälle [4] (s. Abb. 17.4).

Bislang fehlt es noch an empirischen Belegen für den übergreifenden Sicherheitsgewinn von Fahrzeugen mit höheren Automatisierungsgraden. Eines der ersten umfangreicheren Prognosemodelle der Fahrzeugsicherheits- und Unfallforschung hat Daimler veröffentlicht. Ermittelt wurde dabei das Unfallvermeidungspotenzial automatisierter Fahrzeuge mittels angenommener Einführungs- und Marktdurchdringungsszenarien durch Expertenabschätzungen und Prognosen Dritter zusammen mit GIDAS-Daten. Die Prognose, die eine erste grobe Abschätzung liefern kann, basiert auf einer Vermeidbarkeit von insgesamt 198.175 durch Pkw verursachten Kollisionen im Jahr 2010 (s. Abb. 17.4). Die Annahmen berücksichtigen Veränderungen innerhalb der jeweiligen Unfalltypen (Längsverkehr, ruhender Verkehr, Fußgänger, Einbiegen/Kreuzen, Abbiegen, Fahrurfälle). So zeigt sich, dass Fahrurfälle und Unfälle im Längsverkehr bis zum Jahr 2060 durch eine zunehmende Automatisierung um ca. 15 Prozent abnehmen, während Einbiege- und Kreuzungsunfälle mit ca. 10 Prozent anteilig ansteigen [34].

Auf Grundlage dieser Abschätzungen einer zunehmenden Automatisierung wäre eine Unfallreduktion um 10 Prozent bis 2020 erreichbar. In den weiteren Jahren ist eine Reduktion um 19 Prozent bis 2030, um 23 Prozent bis 2040, um 50 Prozent bis 2050, um 71 Prozent bis 2060 und eine annähernd vollständige Vermeidung für das Jahr 2070 erreichbar [34]. Nach dieser Prognose verursacht ein Pkw im Jahr 2070 nahezu keine Unfälle, jedoch kann er schwere Kollisionen erleiden. Anzunehmen ist, dass ein automatisiertes Fahrzeug die eine oder andere Kollision vermeiden kann, die ein Dritter verursacht. Allerdings bleibt bei dieser Betrachtung eine Unfallverursachung durch andere Verkehrsteilnehmer unberücksichtigt. Mögliche technische Fehler (s. Abb. 17.5) bleiben ebenfalls unbeachtet.

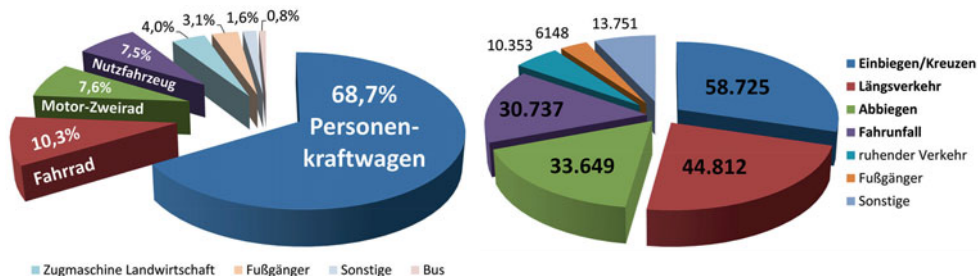


Abb. 17.4 Pkw als Hauptunfallverursacher und Unfalltypen, Quelle: DESTATIS, GIDAS

Hinzu kommt, dass die verwendeten Daten des statistischen Bundesamtes, und vor allem die Aussagekraft aus GIDAS, hauptsächlich auf Crash- und Post-Crash-Aussagen zu Kollisionen mit Verletzten fokussieren (vgl. [35]). Für eine ganzheitliche Evaluierung relevanter Verkehrsszenarien und Unfallschwerpunkte zur aktiven Sicherheit regelkonform fahrender hoch- sowie vollautomatisierter Fahrzeuge empfiehlt der Autor darüber hinaus die Einbeziehung weltweit erhobener Verkehrsunfalldaten – einschließlich der Kollisionen ohne Personenschaden, Beinahekollisionen, Verkehrssimulationen und Wetterdaten. Diese könnten noch mit Informationen von Krankenhäusern und Versicherungen ergänzt werden. Dafür ist eine Verknüpfung gemeinsamer Kriterien aller bekannten Kollisionen mittels international geografisch definierter Verkehrsunfall-, Wetterdaten und zugehöriger Verkehrsflussdaten anzustreben. Beispielsweise liegen für die Bundesstaaten der USA über www.saferoadmaps.org ortsgebundene Unfallinformationen vor. Ähnlich veröffentlicht die britische Regierung Einzelheiten anhand von www.data.gov.uk, die wiederum über eine UK Road Accident Map verortet sind. Regionale Unfalldaten in Deutschland können aus polizeilichen IT-Anwendungen – in einigen Bundesländern aus dem Geografischen Lage-, Analyse-, Darstellungs- und Informationssystem (GLADIS), dem Verkehrs-Unfall-Lage-Karten und Analyse-Netzwerk (VULKAN), dem Brandenburgischen Expertensystem für die Analyse und Dokumentation von unfallauffälligen Streckenabschnitten (BASTa), dem Geografischen Polizeilichen Informationssystem für Verkehrsunfälle (GEOPOLIS V) oder der weit verbreiteten Elektronischen Unfalltypensteckkarte (EUSka) [36] – entnommen werden.

Fazit: Für hoch- und vollautomatisiertes Fahren existieren weder verbindliche Funktionsbeschreibungen einer marktreifen Serienlösung noch Aussagen über konkrete Funktionsgrenzen, weshalb für Prognosen zum Sicherheitspotenzial bis dato zahlreiche Annahmen zu treffen sind. Noch fehlen verbindliche Aussagen über Markteinführungen und -verbreitung. So bieten heutige Ansätze zum Sicherheitspotenzial auf der Basis von Unfalldaten lediglich eine beschränkte Aussagekraft. Daher empfiehlt sich die Zusammenführung vertiefter Unfalldatensammlungen (beispielsweise GIDAS) mit allen weltweit verfügbaren Verkehrsunfalldaten, Verkehrssimulationen und den zugehörigen Wetterinformationen.

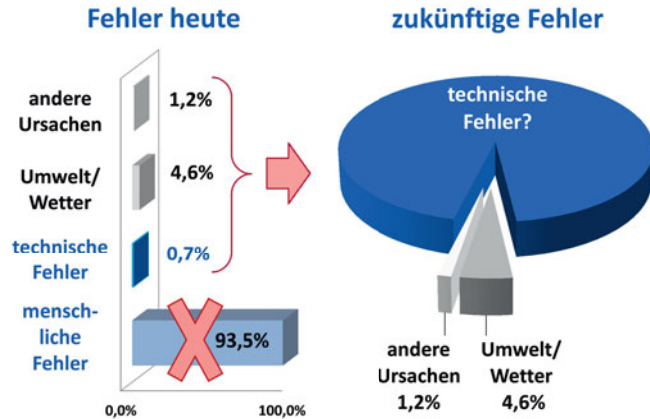
17.5 Sicherheitspotenzial versus Risiken zunehmender Automatisierung

17.5.1 Menschliche und technische Fehler bei Vollautomatisierung

Ausgehend davon, dass die meisten Unfälle durch menschliche Fehler verursacht werden, wäre mit fehlerfreien vollautomatisierten Fahrzeugen die Realisierung der „Vision Zero“ annähernd möglich. Allerdings ist auch bei vollautomatischem Fahren mit technischen Fehlern selbstfahrender Fahrzeuge zu rechnen.

Die linke Seite der Abb. 17.5 zeigt die statistische Unfallursachenverteilung auf Basis der GIDAS-Unfalldatenbank. Auf der Grundlage von Unfalldaten ist das menschliche Fehlverhalten mit einem Anteil von 93,5 Prozent das Hauptrisiko für Verkehrsunfälle.

Abb.17.5 Heute resultieren Unfälle zu 93,5 Prozent aufgrund menschlicher Fehler. Bei Vollautomatisierung gäbe es keine menschlichen Fehler mehr. Allerdings könnte der Anteil technischer Fehler zukünftig deutlich vergrößert wahrgenommen werden.



Dagegen fallen Einflüsse durch die Fahrumgebung – beispielsweise Fahrbahnbeschaffenheit oder Witterung – mit 4,6 Prozent sowie Mängel am Fahrzeug mit 0,7 Prozent laut Statistik relativ gering aus [37].

Bei Vollautomatisierung entfallen die durch menschliche Fahrfehler verursachten Unfälle. Die Kategorie „technische Fehler“ wird durch neue Risiken des vollautomatischen Fahrens anteilig vergrößert und in der Wahrnehmung der Gesellschaft erhöhte Aufmerksamkeit finden (s. Abb. 17.5).

17.5.2 Sicherheitspotenzial – Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine

Die Verkehrssicherheit von Fahrzeugen hängt heute im Wesentlichen von der Leistungsfähigkeit des Menschen mit Unterstützung sicherheitserhöhender Systeme ab. Vollautomatisierte Fahrzeuge werden nur von der maschinellen Leistungsfähigkeit abhängig sein. Je nach Automatisierungsgrad ersetzen technische Systeme Wahrnehmungen, Erfahrungen sowie das Urteils- und Reaktionsvermögen des Menschen. Aus den unterschiedlichen Stärken und Schwächen von Mensch und Maschine ergeben sich das Sicherheitspotenzial und die Risiken einer zunehmenden Automatisierung bei der Fahrzeugführung.

So können Maschinen beispielsweise nicht auf unbekannte Situationen reagieren oder Bewegungen von Kindern interpretieren (s. Kap. 20). Der Mensch hingegen kann unachtsam sein, schlecht Abstände oder Geschwindigkeiten einschätzen und nur in einem begrenzten Sichtfeld wahrnehmen [29].

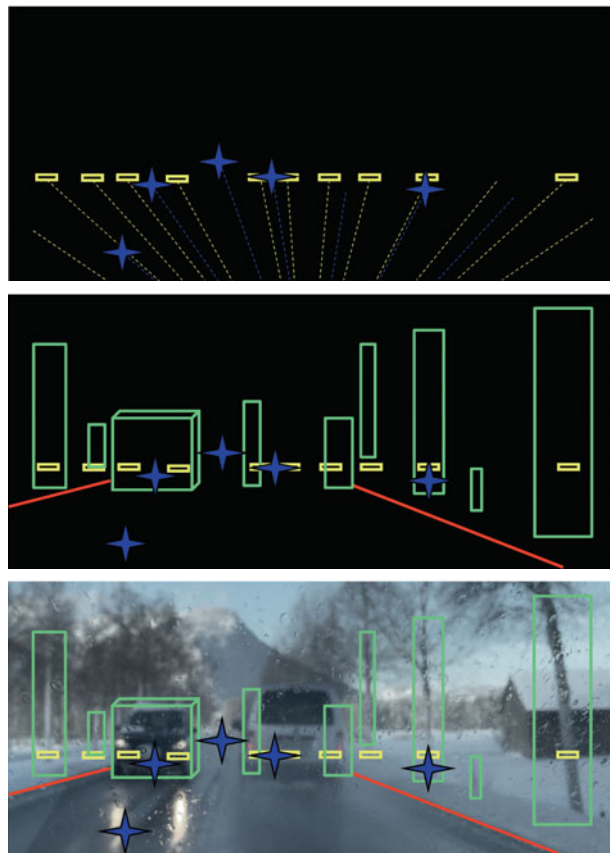
17.5.2.1 Maschinelle versus menschliche Wahrnehmung im Verkehrsgeschehen

Zur Veranschaulichung der eingeschränkten Leistungsfähigkeit technischer Wahrnehmung im Vergleich zur menschlichen wird im Folgenden ein stark vereinfachtes und unvollständiges Modell derzeit am Markt genutzter Sensortechnologien verwendet. Damit ein Fahr-

zeug Informationen über die Umgebung erhält, sind Sensoren notwendig, die nach ihrem physikalischen Messprinzip klassifiziert werden können. Im Automobilbereich kommen heute vor allem Radar, Lidar, Nah- bzw. Ferninfrarot-, Ultraschallsensoren und Kameras zur Anwendung. In Abb. 17.6 wird im oberen und mittleren Bild die eingeschränkte maschinelle Wahrnehmung einzelner Messprinzipien vereinfacht farblich dargestellt. Demgegenüber steht die eingeblendete menschliche Wahrnehmung zusammen mit allen vorgenannten Messergebnissen im unteren Bild bei erschwerten Licht- und Wetterbedingungen (Sonne, Gegenlicht, nasse Fahrbahn, Spritzwasser, Vereisung, Fahrbahnmarkierungen nur teilweise sichtbar). Bei genauer Betrachtung sieht man, dass es sich beim Radarmesspunkt links unten (blau) um eine fehlerhafte Detektion handelt, die von einer Reflexion auf der Gegenfahrbahn stammt (vgl. [38, 39]).

Zudem verdeutlicht Abb. 17.6, dass das Ergebnis maschineller Wahrnehmung und Interpretation komplexer Verkehrssituationen die Entwicklungsingenieure bislang vor erhebliche technische Herausforderungen stellt. Dies betrifft die Detektion von statischen und dynamischen Objekten, ihre möglichst genaue physikalische Vermessung und die Zuordnung der korrekten semantischen Bedeutung der detektierten Objekte (s. Kap. 20).

Abb. 17.6 Maschinelle versus menschliche Wahrnehmung (oberes Bild: Radar in Blau mit Lidar in Gelb, mittleres Bild: Ergänzung mit Kamera-Bildverarbeitung in Grün und Rot, unteres Bild: Überlagerung maschineller mit menschlicher Wahrnehmung)



17.5.2.2 Menschliche versus maschinelle Leistungsfähigkeit

Für differenzierte Potenzialabschätzungen ist ein Vergleich der Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine erforderlich.

Eine Analyse der Wahrnehmungsprozesskette gibt vertiefende Erkenntnisse über menschliche Fehler im Verkehrsgeschehen. Hierzu wird die Bewertung psychologischer Daten aus Verkehrsunfällen herangezogen [40]. Dabei hat sich im Rahmen der interdisziplinären Unfallanalyse eine Fehlerklassifikation mit fünf Kategorien bewährt. Diese Fünf-Schritt-Methode ist eine praxisbewährte Weiterentwicklung des gemeinsam mit GIDAS entwickelten Unfallursachenschemas ACASS (Accident Causation Analysis with Seven Steps) analog dem Sieben-Schritt-Prinzip nach Jens Rasmussen [41]. Mit dieser Methode ist es möglich, menschliche Fehler zu identifizieren, den Zeitpunkt im Verlauf des Wahrnehmungsprozesses vom Informationszugang bis zur Handlung zu bestimmen und die jeweilige Fehlerart zu bewerten (s. Abb. 17.7). Die zugehörigen Fragen betreffen den Informationszugang (Waren relevante Informationen der Verkehrssituation für den Fahrer zugänglich? War das Sichtfeld frei?), die Informationsaufnahme (Hat der Fahrer die Verkehrssituation genau beobachtet und relevante Informationen erkannt?), die Informationsverarbeitung (Hat der Fahrer die Verkehrssituation aufgrund der verfügbaren Informationen korrekt interpretiert?), die Zielsetzung (Hat der Fahrer eine situativ angemessene Entscheidung getroffen?) und die Handlung (Hat der Fahrer die Entscheidung korrekt umgesetzt?). Im Ergebnis zeigt die Unfallanalyse nach dieser Einstufung beim Menschen vorwiegend Fehlerquellen im Informationszugang und bei der Informationsaufnahme (s. Abb. 17.7, [25]).

Für die maschinelle Wahrnehmung nennt Klaus Dietmayer (s. Kap. 20) drei wesentliche Unsicherheitsdomänen, die der menschlichen Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung entsprechen. Es handelt sich um die Zustandsunsicherheit, die Existenzunsicherheit und die Klassenunsicherheit. Alle drei haben direkten Einfluss auf die maschinelle Leistungsfähigkeit. Steigen die Unsicherheiten in diesen Bereichen über ein noch zu definierendes

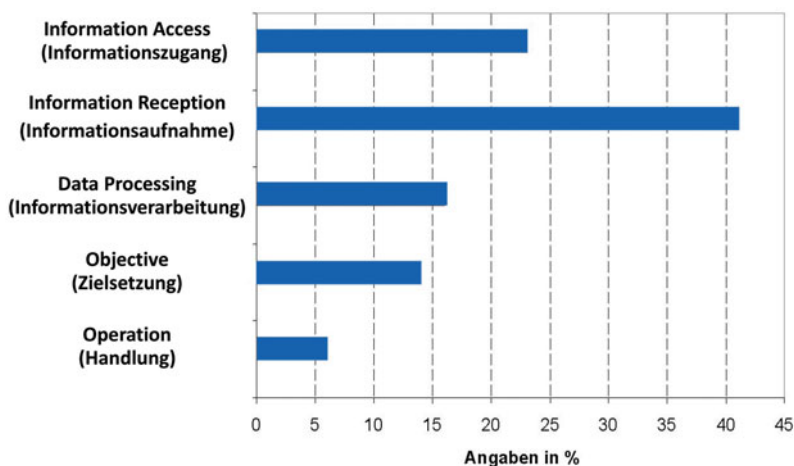


Abb. 17.7 Verteilung menschlicher Fehler im Straßenverkehr (vgl. [25])

tolerables Maß an, ist mit Fehlern innerhalb der Führung des automatisierten Fahrzeugs zu rechnen. Zur Voraussagefähigkeit sind bislang lediglich Trendaussagen möglich.

Die heute bekannten Methoden zur Schätzung von Zustands- und Existenzunsicherheiten erlauben zwar eine aktuelle Einschätzung der Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung, eine Degeneration der Leistungsfähigkeit einzelner Sensoren oder gar ein Ausfall von Komponenten kann aber prinzipbedingt nicht vorhergesagt werden (s. Kap. 20, S. 432).

17.5.3 Sicherheitspotenzial vollautomatisierter Fahrzeuge bei unabwendbaren Ereignissen

Zusätzlich sind für Betrachtungen des Sicherheitspotenzials vollautomatisierter Fahrzeuge die fortbestehenden Risiken im Bereich komplexer Verkehrssituationen bzw. heute bekannter unabwendbarer Ereignisse zu berücksichtigen. So treten Unfallgefahren an unübersichtlichen Knotenpunkten oder hinter Sichtverdeckungen auf. Bei einer Einzelfalluntersuchung im Rahmen einer Dissertation an der Universität Regensburg wurden Sichtverdeckungen bei einem Anteil von ca. 19 Prozent aller Fälle als Mitursache identifiziert [40]. Beispiele hierfür sind Bäume, Sträucher, Hecken oder hohes Gras. Von einer Verdeckung spricht man auch, wenn beispielsweise ein Kind im Stadtverkehr plötzlich und unerwartet zwischen parkenden Fahrzeugen oder aus einer Hofeinfahrt vor das Fahrzeug läuft.

Bei der vollautomatisierten Fahrzeugführung ist in derartigen Verkehrssituationen eine Prädiktion des aktuellen Bewegungsverhaltens von Objekten in die Zukunft erforderlich. Hier stößt auch die Technik bislang an ihre Grenzen.

Aufgrund der Vielzahl der möglichen und nicht voraussehbaren Ereignisse, insbesondere reaktiver Aktionen anderer Verkehrsteilnehmer, steigen die Unsicherheiten der Situationsprädiktion nach etwa 2 s–3 s so stark an, dass hierauf keine verlässliche Trajektorienplanung mehr möglich ist. (s. Kap. 20, S. 434)

17.6 Fazit und Ausblick

Erkenntnisse aus der Verkehrsunfallforschung bestätigen: Menschliches Versagen ist die Hauptursache von Verkehrsunfällen. Dabei treten insbesondere Fehler im Ablauf des Wahrnehmungsprozesses, bei der Informationsaufnahme und beim Informationszugang auf.

Um aus Unfalldaten das Sicherheitspotenzial hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge abzuschätzen, ist ein differenzierter Vergleich der Gesamtleistungsfähigkeit von Menschen und Maschinen erforderlich. Dieser wird jedoch erst möglich, wenn exakte Kenntnisse über die Funktionsausprägung mit den technischen Grenzen geplanter Serienentwicklungen verfügbar sind.

Statistisch abgesicherte Expertenauswertungen belegen bereits heute das Potenzial zukünftiger sicherheitsunterstützender Fahrzeug- und Fahrerassistenzsysteme. So kann be-

reits vor Entwicklungsbeginn der mögliche Nutzen abgeschätzt werden, und der Automobilhersteller kommt mit der Analyse und Auswertung von Verkehrsunfällen zusätzlich seiner Produktbeobachtungspflicht nach.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Analyse von Verkehrsunfällen heute nachweisbar, dass die Automatisierungen von Fahrfunktionen in den Kategorien „driver only“ über „assistiert“ bis zum „teilautomatisierten“ Fahren als Schlüsseltechnologie zur Milderung der Folgen menschlichen Versagens beitragen.

Prognosen zum Sicherheitspotenzial „hoch- und vollautomatisierter“ Fahrzeuge auf der Basis von Verkehrsunfalldaten liefern lediglich Ergebnisse, die auf zahlreichen Annahmen basieren. Dies gilt in besonderer Weise, wenn sie permanent alle Fahraufgaben im Straßenverkehr ohne Fahrerüberwachung übernehmen. Einen Ausblick auf den möglichen Sicherheitseinfluss vollautomatisierter Fahrzeuge gibt eine erste Abschätzung der Daimler-Unfallforschung, die auf mehreren Expertenannahmen basiert. Gemäß dieser Abschätzung lassen sich die Unfallzahlen bis zum Jahr 2070 – unter Annahme einer erfolgreichen Marktdurchdringung – annähernd vollständig reduzieren. Allerdings wurden ausschließlich durch Pkw ausgelöste Unfälle unter Ausschluss physikalischer Grenzen bzw. möglicher technischer Mängel betrachtet. Somit basiert diese Abschätzung auf einigen Annahmen, die zukünftig noch im Detail zu verfeinern und zu validieren sind.

Technische Herausforderungen erschweren derzeit valide Prognosen zum Sicherheitspotenzial. Insbesondere die Wahrnehmung und Interpretation komplexer Verkehrssituationen stellt Entwicklungsingenieure bislang vor erhebliche technische Herausforderungen. Weiterhin wird die Leistungsfähigkeit des Menschen häufig unterschätzt. Fahrerassistenzsysteme gleichen im Wesentlichen anhand von Erkenntnissen aus Verkehrsunfallanalysen die Schwächen menschlicher Fähigkeiten aus. Sie können die Sicherheit in Routinefahrsituationen mit menschlicher Überwachung erhöhen. Dagegen müssen fahrerlose Fahrzeuge zunächst die Fahrfähigkeiten des aufmerksamen menschlichen Fahrers erreichen, um anschließend die Fähigkeiten des Menschen für eine weitere Reduktion der Verkehrsunfallzahlen zu übertreffen. Erst wenn diese technischen Hürden genommen sind, ist eine großflächige Einführung marktreifer vollautomatischer Fahrzeuge zu erwarten.

Zusammengefasst beschränken folgende Aspekte die Aussagefähigkeit der Prognosen zum Sicherheitspotenzial der Automatisierung von „driver only“- bis zu vollautomatisierten Fahrzeugen:

- Bislang ausgewiesene Sicherheitspotenziale von „driver only“ bis hin zu fortgeschrittenen Automatisierungsgraden sind je nach Herkunft der verwendeten Daten mit Bedacht zu beurteilen und zu verwerten. Die Aussagekraft und Prognosefähigkeit des Datenmaterials sind jeweils abhängig von der Auswahl und Bewertung der Merkmale.
- Unterschiedliche Herangehensweisen in Potenzialbewertungen sind unter fachkundiger Betrachtung zu vergleichen. Ein Wirkfeld zeigt im Idealfall eine maximal mögliche Vermeidbarkeit von Verkehrsunfällen. Im Gegensatz dazu steht der tatsächlich ausweisbare Nutzen, der deutlich geringer ausfällt.

- Die Aussagefähigkeit von Auswertungsmethoden kann stark variieren: Es macht einen Unterschied, ob ein erfahrener Unfallrekonstrukteur oder -analytiker mit allen Beteiligten sämtlicher Entwicklungsprozesse aktueller Systeme – in Absprache mit Medizinerinnen und Psychologen – eingebunden ist oder nicht. Auf der Basis dieser vielschichtigen Hintergrundinformationen erhält er einen Gesamtüberblick über ein komplexes Unfallereignis und kann genauer rekonstruieren bzw. analysieren als ein Kollege ohne dieses Detailwissen.
- Oft entstehen innerhalb einzelner und zwischen mehreren Potenzialbetrachtungen viele Wirkfeldüberschneidungen, die das Gesamtwirkfeld reduzieren.
- Für weiterführende Erkenntnisse sollten vertiefende Erhebungen schwerer Verkehrsunfälle (beispielsweise GIDAS) mit weltweit verfügbaren Verkehrsunfalldaten, Wetterdaten und idealerweise mit Verkehrssimulationen (s. Kap. 15, 16) zusammengeführt werden. Resultierende Ergebnisse dienen der Entwicklung, Auslegung und dem Test sicherer automatisierter Fahrzeuge (s. Kap. 28).
- Ab dem Grad der Hochautomatisierung entfällt – zumindest zeitweise – die Beherrschbarkeit durch die am Unfallgeschehen beteiligten Personen. Damit gewinnen Maßnahmen zur Risikoreduktion für die Gewährleistung der funktionalen Sicherheit bezüglich der elektrisch/elektronischen Komponenten an Relevanz.
- Der Wirkgrad vollautomatischer Fahrzeuge lässt sich derzeit nicht genau quantifizieren, da zahlreiche technische und marktspezifische Faktoren im Detail noch unbekannt sind.
- Anzunehmen ist, dass sich einzelne Unfallszenarien selbst durch Steigerung des Automatisierungsgrades bis hin zur Vollautomatisierung trotz regelkonformer Fahrweise nicht ausschließen lassen. Dies trifft beispielsweise bei fahrphysikalischen Grenzen oder zeitkritischen Situationen zu, wie dem plötzlich vor das Fahrzeug laufenden Kind.

Das Sicherheitspotenzial vollautomatischer Fahrzeuge basiert letztlich auch auf der Annahme, dass über 90 Prozent heutiger Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind. Auch wenn die Technik fahrerloser Fahrzeuge niemals eine 100-prozentige Perfektion erreichen wird und dadurch wenige neue bislang unbekannte Unfallkonstellationen entstehen können, scheint die Vision von flächendeckend fahrerlosen Fahrzeugen im Straßenverkehr einen gesellschaftlich erstrebenswerten Nutzen zu versprechen. Deshalb sind Forschungsaktivitäten mit weltweit beteiligten interdisziplinären Experten, die das Thema der Fahrzeugautomatisierung vorantreiben, zu stärken.

Literatur

1. Bengler K, Flemisch F (2011) Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung – Grundlegende Ergonomische Fragestellungen, 5. Darmstädter Kolloquium: kooperativ oder autonom? Darmstadt
2. Bengler K, Dietmayer K, Färber B, Maurer M, Stiller C, Winner H (2014) Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives, IEEE Intelligent Transportation System Magazine, ISSN 1939-1390, Volume 6, Issue 4, S. 6–22

3. Katzourakis D, Olsson C, Lazic N, Lidberg M (2013) Driver Steering Override Strategies for Steering based Active Safety Systems, In: FAST-zero 2013 – Second International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident, Nagoya
4. Statistisches Bundesamt (2014) Destatis, Zahlen und Fakten, Wiesbaden
5. Kramer F (2013) Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen: Biomechanik – Simulation – Sicherheit im Entwicklungsprozess, Vieweg Teubner, Wiesbaden
6. Gasser T, Arzt C, Ayoubi M, Bartels A, Bürkle L, Eier J, Flemisch F, Häcker D, Hesse T, Huber W, Lotz C, Maurer M, Ruth-Schumacher S, Schwarz J, Vogt W (2012) Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Wirtschaftsverlag NW, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F83, Bergisch Gladbach
7. National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA (2013) Preliminary statement of policy concerning automated vehicles, Washington DC
8. Society of Automotive Engineers – SAE International (2014) Levels of driving automation for on road vehicles, Warrendale PA
9. National Highway Traffic Safety Administration NHTSA (2014) Fatality Analysis Reporting System (FARS), Washington
10. Amoros E, Brosnan M, Wegman F, Bos N, Perez C, Segui M, Heredero R, Noble B, Kilbey P, Feypell V, Cryer C (2009) Reporting on Serious Road Traffic Casualties, International Traffic Safety Data and Analysis Group – IRTAD, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), International Transport Forum, Paris
11. Zobel R, Winkle T (2014) Persönliche Kommunikation, Wolfsburg u. Braunschweig
12. Schubert A, Erbsmehl C (2013) Simulation realer Verkehrsunfälle zur Bestimmung des Nutzens für ausgewählte simTD-Anwendungsfälle auf Basis der GIDAS-Wirkfeldanalyse – zur Darstellung eines maximal anzunehmenden Wirkfeldes – von Winkle T, Mönnich J, Bakker J, Kohsiek A (2009), Forschungsbericht simTD, gefördert von den Ministerien BMWi, BMBF, BMVBS, Berlin
13. Burg H, Moser A (2009) Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, 2. Auflage, Vieweg Teubner, Wiesbaden
14. O'day J (1986) Remarks about U. S. Accident Investigation Programs FARS und NASS. In: Bierau D, O'day J, Grush E, Erfassung und Auswertung von Straßenverkehrsunfalldaten, Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Schriftenreihe 54, S. 29–31, Frankfurt (Main)
15. Matthaer R, Reschka A, Rieken J, Dierkes F, Ulbrich S, Winkle T, Maurer M (2015) Autonomes Fahren, In: Winner H, Hakuli S, Lotz F, Singer C (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, S. 1146–1168, Vieweg Teubner, Wiesbaden
16. Hummel T, Kühn M, Bende J, Lang A (2011) Fahrerassistenzsysteme – Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der Deutschen Versicherer, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Forschungsbericht FS 03, Berlin
17. Unger T (2013) ADAC Unfallforschung – Fallverteilung, Datenerhebung, Auswertungen, Landsberg/Lech
18. Schittenhelm H, Bakker J, Bürkle H, Frank P, Scheerer J (2008) Methods for analyzing the efficiency of primary safety measures based on real life accident data, ESAR 2008, Hannover
19. Koltze K, Souchkov V (2011) Systematische Innovation: TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung, Hanser, München, Wien
20. Duden (2014) Die deutsche Rechtschreibung, Bibliographisches Institut, 23. Auflage, Mannheim
21. Daimler AG Communications (2011) Der Weg zum unfallfreien Fahren, COM/M 5836/1635/00/0511, Stuttgart
22. Langwieder K, Gwehenberger J, Hummel T (2003) Benefit Potential of ESP in Real Accident Situations involving Cars and Trucks, 18. International ESV-Conference, Nagoya
23. Zobel R, Friedrich H, Becker H (2000) Accident Research with Regard to Crash Avoidance, Transactions/Vehicle Safety 2000 Conference, London

24. Hörauf U, Buschardt B, Donner E, Graab B, Winkle T (2006) Analyse von Verkehrsunfällen mit FAS-Potenzialeinschätzung am Beispiel des FAS Lane Departure Warning. In Tagung Aktive Sicherheit 2006, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, München
25. Chiellino U, Winkle T, Graab B, Ernsberger A, Donner E, Nerlich M (2010) Was können Fahrerassistenzsysteme im Unfallgeschehen leisten? In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 3/2010, TÜV Media GmbH, S. 131–137, Köln
26. Donner E, Winkle T, Walz R, Schwarz J (2007) RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS). In Technischer Kongress 2007, Verband der Automobilindustrie (VDA), S. 231–241, Sindelfingen
27. Becker S, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2003) Introduction of RESPONSE 2, EU Projekt, In: Maurer M, Stiller C (Hrsg.), 2. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS2003, Leinsweiler
28. Becker S, Mihm J, Brockmann M, Donner E, Schollinski H-L, Winkle T, Jung C, Dilger E, Kanz C, Schwarz J, Bastiansen E, Andreone L, Bianco E, Frost F, Risch A, Eegher van G, Serval A, Jarri P, Janssen W (2004) Steps towards a Code of Practice for the Development and Evaluation of ADAS, RESPONSE 2, European Commission Public Report, Project Deliverable D3, Brüssel
29. Knapp A, Neumann M, Brockmann M, Walz R, Winkle T (2009) Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, Preventive and Active Safety Applications, eSafety for road and air transport, European Commission Project, Brüssel
30. Association for the Advancement of Automotive Medicine (2005) The Abbreviated Injury Scale (AIS) Update 2008, Barrington IL
31. International Organization for Standardization (ISO), ISO 26262-3 (2011): Road Vehicles – Functional safety
32. Busch S (2005) Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 588, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
33. Klanner F (2008) Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug, Dissertation, Darmstadt
34. Unselt T, Schöneburg R, Bakker J (2013) Insassen und Partnerschutz unter den Rahmenbedingungen der Einführung autonomer Fahrzeugsysteme, In: 29. VDI/VW-Gemeinschaftstagung „Automotive Security“, Wolfsburg
35. Schubert A, Erbsmehl C, Hannawald L (2012) Standardised Pre-Crash-Szenarios in digital format on the basis of the VUFO Simulation, Dresden
36. Dick R (2011) Die Polizeilichen- Online- Informationssysteme in der Bundesrepublik Deutschland, Books on Demand GmbH, Norderstedt
37. GIDAS – German In-Depth Accident Study – Unfalldatenbank, Dresden, Hannover
38. Becker S, Brockmann M, Jung C, Mihm J, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2004) ADAS – from Market Introduction Scenarios towards a Code of Practice for Development and Evaluation, Final Report, RESPONSE 2 – European Commission, Public Report, Brüssel
39. Donner E, Schollinski H-L, Winkle T, Jung C, Dilger E, Kanz C, Schwarz J, Bastiansen E, Andreone L, Becker S, Mihm J, Jarri P, Frost F, Janssen W, Baum H, Schulz W, Geissler T, Brockmann M (2004) Methods for Risk-Benefit-Analysis of ADAS: Micro Perspective and macroscopic socioeconomic evaluation, RESPONSE 2, European Commission Public Report, Project Deliverable D2, Brüssel
40. Gründl M (2006) Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation, Regensburg
41. Rasmussen J (1982) Human errors: a taxonomie for describing human malfunction in industrial installations. Journal of Occupational Accidents 4, S. 311–333, Elsevier Scientific Publishing Company, Philadelphia PA

Heike Flämig

Inhaltsverzeichnis

18.1 Einleitung 378

18.2 Entwicklungsgeschichte fahrerloser und autonomer Transportsysteme 379

 18.2.1 Fahrerlose Transportsysteme im Innenbereich 379

 18.2.2 Fahrerlose Transportfahrzeuge im Außenbereich 381

 18.2.3 Autonome Fahrzeuge für den Straßengütertransport außerhalb
 von Betriebsgeländen 382

 18.2.4 Entwicklungen autonomen Fahrens und autonomer Fahrzeuge
 in den anderen Verkehrsträgern 382

 18.2.5 Zwischenfazit 383

18.3 Anwendungsfälle im Bereich des autonomen Gütertransports 384

 18.3.1 Exkurs: Automatisierungsgrade des autonomen Gütertransports 385

 18.3.2 Anwendungsfälle des autonomen Gütertransports 385

 18.3.3 Autobahnpilot mit Fahrer und freier Navigation 386

 18.3.4 Vehicle-on-Demand als Autobahnfahrt ohne Fahrer mit freier Navigation 387

 18.3.5 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Follow-Me-Fahrzeug 389

 18.3.6 Valet-Parken – Valet delivery 389

**18.4 Veränderungen in der Supply Chain durch einen höheren Automatisierungsgrad
im Gütertransport** 390

**18.5 Erste einzelwirtschaftliche Einschätzungen
von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette** 392

H. Flämig (✉)
Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Verkehrsplanung und Logistik, Deutschland
flaemig@tu-harburg.de

18.6 Erste gesamtwirtschaftliche Einschätzungen von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette	393
18.7 Fazit und Ausblick	394
Literatur	397

18.1 Einleitung

Zur Erhöhung von Produktivität, Zuverlässigkeit und Flexibilität der Raumüberwindung nimmt der Automatisierungsgrad der Fahrzeuge sowohl im Bereich der Verkehrsträger als auch im Bereich des innerbetrieblichen Transports kontinuierlich zu. Durch die anwachsende Informationsdichte und Komplexität räumlicher Arbeitsteilung gewinnt die Idee der sich selbststeuernden, dezentralen Einheiten an Bedeutung. Die Konzentration der öffentlichen und wissenschaftlichen Diskussion zum autonomen Fahren mit individuellen Personenkraftwagen vernachlässigt bisher allerdings rund ein Drittel des Verkehrs auf öffentlichen Straßen, nämlich den Wirtschaftsverkehr. Wiederum ein Drittel des Wirtschaftsverkehrs entsteht durch den Transport von Gütern, der notwendig ist, da der Ort der Gütererstellung selten dem Ort der Güternachfrage entspricht. Das Fahren selbst stiftet keinen Mehrwert und ist nur Mittel zum Zweck der Raumüberwindung. Aus diesem Grund wurden bereits in den 1950er-Jahren erste Anwendungen in der innerbetrieblichen Logistik entwickelt, bei denen der Transport ohne Fahrer realisiert werden konnte. Die Entwicklung sogenannter Fahrroboter erfolgte vor allem für spezielle Missionen in gefährlichen oder kaum zugänglichen Gebieten. Automatisierte, fahrerlose und teilweise autonome Fahrzeuge sind also schon seit Längerem für den Transport von Gütern in der Produktion oder in logistischen Systemen im Einsatz.

Ganz grundsätzlich stellt sich die Frage, inwieweit auch im Straßengüterverkehr auf öffentlicher Infrastruktur vollautomatisches Fahren eine sinnvolle Anwendung sein kann. Daran knüpfen sich weitere Fragen an die notwendigen technischen und organisatorischen sowie rechtlichen und sicherheitsbezogenen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung und sich daraus möglicherweise ergebenden Veränderungen in der Logistik bzw. in Supply Chains und im Güterverkehrssystem.

Das Kapitel nähert sich diesen Fragestellungen zunächst historisch aus der Perspektive der innerbetrieblichen Logistik, da in diesem Zuge die Beweggründe von Unternehmen für die Implementierung von fahrerlosen Transportsystemen gut nachvollziehbar werden und der Erfahrungshintergrund der Unternehmensentscheider offengelegt wird. Anhand von Fallbeispielen aus dem Bereich von Logistik und Güterverkehr werden derzeitige Einsatzfelder aufgezeigt und, soweit bekannt, das für die autonome Fahrt wichtige Navigations- und Sicherheitskonzept sowie die Steuerung beschrieben. Zudem werden aufbauend auf den in Kap. 2 beschriebenen Anwendungsfällen spezifische Anwendungsfälle für den Güterverkehr skizziert. Die sich parallel entwickelnden autonomen Systeme der anderen Verkehrsträger,

beispielsweise Drohnen, zeigen, dass vollkommen neue Geschäftsmodelle im Bereich der Logistik durch autonome Systeme im Entstehen sind. Die zu erwartenden Veränderungen in den logistischen Prozessen sowie die veränderte Rolle der menschlichen Arbeit in den Systemen werden anhand einer generischen Supply Chain diskutiert. Das Kapitel schließt mit Handlungsempfehlungen und der Benennung des weiteren Forschungsbedarfs.

18.2 Entwicklungsgeschichte fahrerloser und autonomer Transportsysteme

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) kamen erstmals Anfang der 1950er-Jahre in Amerika und rund zehn Jahre später in Deutschland zum Einsatz [1]. Im Vordergrund stand die Optimierung des Materialflusses und die Reduzierung des Personaleinsatzes als logische Konsequenz der sich seit dem frühen 19. Jahrhundert ausbreitenden Ideen zur Erhöhung der Produktivität durch die Verbesserung der Arbeitsabläufe (Taylor), über die Vertaktung der Produktionsstufen (insbesondere geprägt durch das „System vorbestimmter Zeiten“ nach Gilbreth) bis hin zur kontinuierlichen Fließbandfertigung (Ford). Getrieben wurde diese Entwicklung durch die Mechanisierung der Produktion aufgrund einer zunehmenden Technikzentrierung des Managements bis hin zur Vorstellung einer vollständigen Automatisierung (vgl. die historische Nachzeichnung bei [1]). Beginnend mit der Automatisierung der Transporte zwischen Bearbeitungsstufen erfolgte die erste Entwicklung von FTS für den Einsatz in der Produktion und im Lager. Im Vergleich zu automatisierten Fördersystemen, beispielsweise Bandanlagen, sind die Investitionen in der Regel wesentlich geringer und die Flexibilität gegenüber Änderungen im Materialfluss wesentlich höher [2]. Zudem gelten Transporte als unproduktiv, müssen aber in Produktions- und Lagersystemen eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen.

18.2.1 Fahrerlose Transportsysteme im Innenbereich

Typische Einsatzbereiche von FTS im Innenbereich bestehen einerseits zwischen den Produktions- und Montagestufen und andererseits im Wareneingang und Warenausgang sowie in der Kommissionierzone und im Lagerbereich. Dabei sind FTS und Arbeitsroboter, beispielsweise zum Kommissionieren, Pallettieren etc., häufig baulich miteinander verbunden. In der innerbetrieblichen Logistik war der Begegnungsfall zwischen Mensch und FTS/FTF daher immer vorgesehen, da FTS/FTF in der Regel weitere Funktionen, z. B. als Kommissionierhilfsmittel, übernehmen. Die frühen Personenschutzkonzepte arbeiteten mit taktilen, mechanischen Bügeln bzw. Bumpers [2]. Heute kommen vermehrt Laserscanner zum Einsatz, die in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bis zu sieben Meter abdecken [2] und häufig mit weiteren Sensortechniken kombiniert werden. Die Stabilisierungsebene spielt im innerbetrieblichen Transport eine untergeordnete Rolle, da das Unternehmen den Untergrund selbst im fahrfähigen Zustand hält.

Die Bahnführungsebene im Indoor-Bereich der innerbetrieblichen Transporte erfolgte bei den frühen Systemen in der Regel mithilfe von stromführenden Leitern, die im Hallenboden eingelassen waren. Heute werden folgende Typen zur Positionserkennung und Positionierung unterschieden [3]: Auf der einen Seite kommt weiterhin die physische Leitlinie zum Einsatz, ausgeführt als aktiv-induktive Leitspur, als Magnetband oder als optische Leitspur. Auf der anderen Seite wird mit Technologien zur freien Navigation gearbeitet, bei denen die Orientierung mithilfe von Bodenmarken (Metall, Magnet, Transponder) oder auf Basis der Lasertechnologie, bei der die Positionsbestimmung ähnlich funktioniert wie in der Seeschifffahrt (Kreuzpeilung), erfolgt. Neuere Technologien kombinieren Laserscanner und Kamerasysteme mit digitalen Umgebungskarten und machen eine Navigation mittels Umgebungsmerkmalen möglich.

Für die Datenübertragung zwischen den stationären und den mobilen Einheiten eines FTS kam früher die induktive bzw. die Infrarot-Datenübertragung zum Einsatz. Heute sind Schmalbandfunk und immer mehr Breitbandfunk (WLAN) vorherrschend. Die Funkpeilung ermöglicht eine Ortung mittels Indoor-GPS (Global Positioning System) mit einer Genauigkeit bis zu 0,5 Metern und mittels Outdoor-GPS mit einer Genauigkeit von zehn Metern, dGPS (Differential GPS) mit einer Genauigkeit bis zu einem Meter oder dGPS mit Phasenauswertung mit einer Genauigkeit bis zu 0,1 Metern.

Fahrzeuge bekommen ihre Fahraufgaben zugewiesen und werden koordiniert [2]. Das Steuerungskonzept besteht aus einer Leitsteuerung, durch die die Transportauftragsabwicklung mit der Transportauftragsverwaltung, der Fahrzeugdisposition und der Fahrauftragsabwicklung zentral erfolgt. Die Verkehrsleitsteuerung ist ein Teil der Fahrauftragsabwicklung. Die Freigabe einzelner Streckenabschnitte geschieht ähnlich wie im Bahnverkehr in Blockstrecken, die jeweils nur von einem Fahrzeug belegt werden dürfen.

Eine beispielhafte Anlage wurde in einem Distributionszentrum eines Logistikdienstleisters im Jahr 2011 realisiert [3]. Bei der Kommissionierung kommen FTS zum Einsatz, die auch die Kommissionierer mit sich führen. Die Sicherheit des Mitfahrers wird durch verschiedene Maßnahmen hergestellt, die wie beim Bahntransport vom Zugführungspersonal verlangen, dass er eine bestimmte Position mit den Händen und Füßen einnimmt. Andere Betätigungen sind daher während der Fahrt nicht möglich. Das Personenschutzkonzept erfolgt mittels Laserscanner. Für die Navigation wird die Magnetpunktfolge genutzt, und für die Leitsteuerung kommt zur Datenübertragung die WLAN-Technologie zum Einsatz.

Die FTS/FTF-Leitsteuerung erfolgt auch in den neueren Anlagen zentral. Die Erweiterung der Systeme ist daher immer mit einem großen Aufwand verbunden, sodass auch hier zu autonomen, dezentralen Steuerungslösungen geforscht wird.

Ein aktuelles Beispiel ist der autonome Schubmaststapler als Ergebnis des Projekts „marion (mobile, autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten)“, das im Rahmen des Technologieprogramms „Autonomik“ (Autonome und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand) entwickelt wurde. Die Fahrzeuge bekommen ihre Aufgaben von einem übergeordneten System zugewiesen. Der Stapler führt diese Aufgabe autonom aus und berechnet und entscheidet selbstständig über den optimalen Fahrweg. Er ist mit einem 3-D-Laser, Laserscanner und Kameras zur 3-D-Umgebungserfassung ausge-

stattet. Durch Sensorenbündel kann der Stapler die Umgebung exakt erfassen, die Objekt-abmessung und die räumliche Position des Objekts bestimmen.

Eine dezentrale Steuerung stellen beispielsweise [4] vor, die im Rahmen des Projekts „Dezentrale, agentenbasierte Selbststeuerung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)“ erarbeitet wurde. Darin sind für jedes Fahrzeug verschiedene Agenten modelliert. Die Routenplanung und Auftragsvergabe erfolgt kooperativ. Simulationen ergaben eine Reduzierung der Gesamtstrecke aller FTF und des Leerfahrtenanteils um rund acht Prozent, der Durchlaufzeit um 22 Prozent sowie eine geringe Auslastungserhöhung der FTF [5]. Am Fraunhofer Institut für Materialflusstechnik und Logistik (IML) wurde im Projekt „Schwarmintelligenz für die Logistik“ ein zelluläres Transportsystem entwickelt, das auf die Schwarmintelligenz aufbaut. In diesem System erhält der Schwarm (die Transportmittel) die Transportaufträge, das nächstgelegene Transportmittel übernimmt den Auftrag und sucht sich dynamisch den kürzesten Weg.

18.2.2 Fahrerlose Transportfahrzeuge im Außenbereich

Typische Einsatzbereiche autonomer Fahrzeuge im Außenbereich, aber auf privatem Gelände, sind beispielsweise FTS für Schwertransporte oder werksinterne Shuttle-Verkehre.

Auf einem Container-Terminal transportieren sogenannte Automated Guided Vehicle (AGV) Container zwischen den Containerbrücken und dem Containerlager [6]. Dadurch sollen Fahrstrecken verkürzt und Leerfahrten reduziert sowie alle Ressourcen optimal ausgelastet werden. Für die Positionsbestimmung werden im Boden eingelassene Transponder genutzt. Die Routenplanung erfolgt selbstständig, ebenso wie der Batteriewechsel. Die Leitsteuerung erfolgt per Datenfunk.

In Deutschland ist ein starker Treiber des führerlosen Lkw ein Unternehmen, das ursprünglich aus der Funktechnik kommt. Im Jahr 2012 wurde beispielsweise durch dieses Unternehmen ein fahrerloser Lkw-Shuttle zwischen dem Produktions- und Logistikgebäude auf dem Werksgelände einer Molkerei realisiert [7]. Die Be- und Endladung der mit Verpackungsmaterial bzw. Frischprodukten beladenen Euro- und Industriepaletten erfolgt automatisch. Zur Spurführung dienen Transponder in der Fahrbahn. Unter der Zugmaschine ist ein Sensor angebracht, der die Markierung im Boden zur Positionierung und Wegfindung nutzt. Unterstützt durch lenkbare Hinterachsen können kleinere Hüllkurven gefahren und eine auf zwei Zentimeter genaue Positionierung erreicht werden. Laserscanner kontrollieren die Umgebung und stellen zusammen mit Schaltleisten und Not-/Aus-Tasten den Schutz von Personen, Ware und Fahrzeug sicher.

Im Projekt „Sichere autonome Logistik- und Transportfahrzeuge (SaLSA)“ erfolgten technologische Weiterentwicklungen, die den Begegnungsfall von FTS, Lkw und Personen im Außenbereich sicherer machen [8]. Im Außenbereich besteht das Sicherheitskonzept aus Radarsensoren, da dort keine Laserscanner zugelassen sind. Durch die kooperative Erfassung der Umgebung durch mobile und stationäre Sensorik wird die Sicherheit auch bei höheren Geschwindigkeiten (Wirtschaftlichkeit) realisiert.

18.2.3 Autonome Fahrzeuge für den Straßengütertransport außerhalb von Betriebsgeländen

Die Entwicklung autonomer Fahrzeuge für den Gütertransport bzw. die Logistik außerhalb von Betriebsgeländen ist vor allem problemorientiert getrieben. Sogenannte Fahrroboter entstanden für den Einsatz in gefährlichen Situationen, z. B. zur Entschärfung von Munition, oder für den Einsatz in kaum zugänglichen Gebieten, wie beispielsweise für unterirdische Explorationen in der Tiefsee, für Arbeiten am Hang oder in dichtbewachsenen Wäldern oder auch in entlegenen Gebieten, beispielsweise für den Einsatz im Bergbau.

Sehr große automatisierte Lkw mit einer maximalen Beladung von 290 Tonnen kommen seit den 1990er-Jahren in einer der weltgrößten Eisenerzminen in Australien zum Einsatz [9]. Die Gründe für deren Entwicklung waren vor allem Schwierigkeiten bei dem zu akquirierenden Personal für den gefährlichen Schichtdienst im Outback und die hohen logistischen Anforderungen an die Personaleinsatzplanung und den Personentransfer.

Die Navigation erfolgt mit Radar und Lasern sowie durch den Einsatz von Wegpunkten zur Orientierung. Kontroll- und Eingreifmöglichkeiten sind über eine Betriebszentrale mittels WLAN möglich. Die Steuerung erfolgt durch GPS und Koppelnavigation wie bei einem Schiff oder Flugzeug durch laufende Ortsbestimmung (Ortung) indem der Kurs, Fahrt (Geschwindigkeit) und die Zeit ermittelt werden.

18.2.4 Entwicklungen autonomen Fahrens und autonomer Fahrzeuge in den anderen Verkehrsträgern

Auch die anderen Verkehrsträger sind durch eine Zunahme der Automatisierung gekennzeichnet, bei denen technische Systeme zur Stabilisierung, Navigation (z. B. digitale Karten) und Umweltwahrnehmung zunehmend zum Einsatz kommen.

Flugzeuge sind bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts mit Systemen zur Stabilisierung ausgerüstet, der Autopilot ist schon seit Langem die Regel und die ersten Drohnen fliegen in Deutschland für das Militär, die Polizei oder die Feuerwehr. Unmanned Aerial Systems oder auch Unmanned Aerial Vehicles (UAV) kommen in anderen Ländern auch im zivilen Bereich zum Einsatz, beispielsweise ersetzen sie Rancher und Inspektoren im Außenbereich. Drohnen überwachen Felder oder säen aus bzw. führen biologische Schädlingsbekämpfung durch. Kleine Drohnen kommen aber auch schon in Deutschland zum Einsatz, beispielsweise für die Begutachtung von Schäden durch Sturm oder Brand, in der Filmproduktion und bei Industrieinspektionen. Die Deutsche Bahn testete Drohnen für die Überwachung von Fahrzeugen und Infrastruktur. Weiter gibt es Pilotstudien im Bereich des Transports von Wirtschaftsgütern, insbesondere von Paketen. Derzeitige Drohnen könnten bei einer Tragfähigkeit von bis zu 2,5 Kilogramm und einer Reichweite von rund 15 Kilometern beispielsweise Fast-Food oder Medikamente ausliefern. Auch eine Drohne, durch die ein Defibrillator transportiert werden kann, wurde bereits getestet. Die Nutzung von Drohnen für gewerbliche Zwecke über fünf Kilogramm ist mit einer Pauschal-

genehmigung in vielen Bundesländern möglich; allerdings nicht in kontrollierten Lufträumen [10].

Die ersten Forschungsprojekte zur unbenannten Seeschifffahrt laufen derzeit (z. B. das europäische Projekt MUNIN). Unbemannte U-Boote sind schon seit Längerem im Einsatz. Konzepte für Drohnenschiffe werden von unterschiedlichsten Akteuren entwickelt. Ein Konzept ähnelt dem Platooning (s. Abschn. 18.3.4) im Straßenverkehr [11]. Im Unterschied zum Flugverkehr ist es möglich, dass bei stark befahrenen Abschnitten, beispielsweise beim Hafenanlauf, eine Besatzung jederzeit zusteigen kann. In der Regel werden diese Systeme – und werden es wohl auch zukünftig – nicht vollständig autonom agieren. Zwar können Ausweichmanöver selbstständig erfolgen, jedoch ist davon auszugehen, dass es eine zentrale Überwachung und Fern-Steuerung (Tele-Operation) geben wird, wobei beide Instanzen nicht identisch sein müssen.

Die Fernsteuerung von fahrerlosen Eisenbahnen findet bereits seit Jahren statt. Autonomes Fahren würde die freie Navigation mit einschließen und wäre nur für sehr kleine Einheiten zweckmäßig. Bisherige Ansätze für kleinere Gütertransporteinheiten auf der Bahn wie beispielsweise der CargoSprinter waren bisher nicht erfolgreich. Teilweise auch, weil eine schnelle Technik zur Zugbildung und -splittung nicht existiert und daher eine eigene Antriebstechnologie je Waggon notwendig ist. Dieses Manko griff das Konzept RailCab auf [12]. Hier nutzen autonome, mit Linearmotoren angetriebene Fahrzeuge das Rad-Schiene-System. Die Zugbildung erfolgt über eine elektronische Deichsel. Dies ist teuer und es gibt kaum sinnvolle Einsatzfälle, bei denen nicht der Lkw ebenso den Transport übernehmen könnte. Auf den Hauptläufen sprechen Effizienzgewinne durch den Massendegressionseffekt gegen ein nicht-vordisponiertes Routing und eine variable Konvoibildung. Es könnten sich aber ökonomisch sinnvolle Einsatzfälle gerade auf den nicht-elektrifizierten Nebenstrecken ergeben. Bisher sind allerdings keine Studien bekannt, die den ökologisch-ökonomischen Vergleich unter Marktbedingungen anstellen.

18.2.5 Zwischenfazit

FTS bestehen aus einer Leitsteuerung, insbesondere zur Auftragsvergabe und Routenplanung, einem Kommunikationssystem und den Fahrzeugen [4]. Schon seit Langem existieren fahrerlose Transportsysteme und -fahrzeuge (FTS/FTF) für den innerbetrieblichen Transport mit geringen Automatisierungsstufen. Dabei hat der Automatisierungsgrad mit den technologischen Möglichkeiten zugenommen, allerdings anders als im öffentlichen Straßenverkehr. Beispielsweise sind die Sicherheitskonzepte, aufgrund der geltenden Maschinenrichtlinie anders ausgestaltet. In der Vergangenheit war es ausreichend, dass sich die FTS/FTF in der innerbetrieblichen Logistik vorwärts bewegen konnten. Dies erfolgt in der Regel in Szenarien, in denen die Menschen auf die fahrerlosen Fahrzeuge eingestellt waren. Teilweise gibt es eine räumliche Trennung von Mensch und Fahrzeug. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Sicherheitskonzepte auf ein Minimum beschränken, da die FTS/FTF bei geringen Geschwindigkeiten operieren und in bekannter Szenerie.

Die technologische Weiterentwicklung bezog sich schwerpunktmäßig auf die korrekte Ausführung der Transportaufgabe und gegebenenfalls auf damit verbundene Aufgaben wie beispielsweise die Lastaufnahme bzw. -abgabe. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Anforderungen an die Flexibilität der FTS/FTF-Systeme umso größer werden, je mehr sich die Produktion von der linear getakteten Fertigungsstraße entfernt und je flexibler die Produktions- und Kommissioniersysteme werden. Derzeit scheinen autonome Systeme basierend auf der Agententechnologie den Anspruch an die Verarbeitung eines zunehmenden Datenvolumens und einer steigenden Komplexität durch die Dezentralisierung von Datenbereitstellung und Entscheidungsfindung am ehesten leisten zu können.

Outdoor-Lösungen für den Gütertransport beruhen auf konventionellen Straßenfahrzeugen und sind bisher nur auf Betriebsgeländen im Regeleinsatz mit wenigen Einsatzfälle. Es ist aber eine ähnliche Entwicklung denkbar wie im Indoor-Bereich.

Es stellt sich also bei den FTS/FTF vor allem die Frage danach, wie sich die Autonomie der Einheiten weiterentwickelt. Automatische Steuerung und fahrerlose Fortbewegung sind per Definition schon immer Elemente von FTS/FTF gewesen. Der Grad an Autonomie ist definiert als die Anzahl der Freiheitsgrade. Diese hängen beispielsweise von der freien Wahl der Strecke und Geschwindigkeit ab, um sich selbstständig auch bei sich verändernden Umweltsituationen zu einem Ziel hin zu bewegen.

Der Einsatz von mobilen Maschinen bildet einen Schnittstellenbereich zwischen Arbeitsrobotern und Fahrzeugen. Ebenso wie bei den innerbetrieblichen Transportsystemen wird häufig die Transportaufgabe mit weiteren „produktiven“ Aufgaben kombiniert. Es handelt sich zum größten Teil um tele-operierte Systeme. Eine autonome Entscheidungsfindung für die Wegfindung ist also in der Regel nicht gegeben. Dies scheint auch in den meisten Einsatzfällen keinen Mehrwert zu schaffen.

Die konzeptionelle Ausgestaltung der Automatisierungslösungen hing in den Anfangsphasen sehr stark vom Anwendungskontext ab. Diese historischen Systemelemente finden sich auch in den neueren Konzeptansätzen in der Regel wieder, insbesondere hinsichtlich der Sicherheitskonzepte bzw. des Personenschutzes. Erst die mit den neuen Informations- und Kommunikationstechnologien möglichen dezentralen Konzepte lassen nun die unterschiedlichen Systemlösungen zusammenwachsen. Insbesondere dort, wo eine hohe Flexibilität und Geschwindigkeit gefordert wird, gleichen sich die technologischen Lösungen immer weiter an. Allerdings unterscheiden sie sich hinsichtlich der realisierten Freiheitsgrade der Autonomie.

18.3 Anwendungsfälle im Bereich des autonomen Gütertransports

Aufbauend auf den vorliegenden Erfahrungen werden im Folgenden potenzielle Einsatzfelder für autonome Fahrzeuge im Bereich des Gütertransports anhand der in Kap. 2 generisch beschriebenen Anwendungsfälle skizziert. Im Mittelpunkt steht der Transport eines aufgegebenen Förderguts im Straßengüterverkehr. Potenzielle Einsatzfelder weiterer Segmente des Wirtschaftsverkehrs wie beispielsweise der Personenwirtschaftsverkehr oder der

Gütertransport, der im Rahmen der Produktionsfunktion anfällt (selbstfahrende Arbeitsmaschinen), werden nicht betrachtet.

Aufbauend auf einer konzeptionellen Beschreibung des jeweiligen Anwendungsfalls anhand der Merkmalsausprägungen erfolgt eine erste Einschätzung von Nutzen bzw. Chancen und Risiken einer derartigen Einführung. Vorab ist ein Exkurs zu den Automatisierungsgraden des Fahrens für den Gütertransport eingefügt, um die Ausdifferenzierung der Anwendungsfälle besser nachvollziehbar zu machen.

18.3.1 Exkurs: Automatisierungsgrade des autonomen Gütertransports

Für die Einordnung von Notwendigkeit und Nutzen eines konkreten Automatisierungsgrads im Gütertransport soll hier noch einmal kurz die Definition der Fahraufgabe nach [13] genutzt werden, wonach sich die Fahraufgabe folgendermaßen untergliedern lässt: Die sichere Ausführung der Fahraufgabe benötigt Informationen und Wissen über die Verkehrssituation auf der Bahnführungsebene, über die Fahrbahnoberfläche auf der Stabilisierungsebene sowie über das Straßennetz auf der Navigationsebene. Das sichere Führen des Fahrzeugs erfordert Lenken, Gas geben und Bremsen sowie Entscheidungen über die Geschwindigkeit und die Spur zur Längs- und Querverführung des Fahrzeugs. Diese Entscheidungen werden in Abhängigkeit von Informationen über die Umweltbedingungen und dem damit verbundenen Handlungswissen getroffen.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen kategorisiert automatisiertes Fahren in vier Entwicklungsstufen [14]: assistiertes Fahren (1), teilautomatisiertes Fahren (2), hochautomatisiertes Fahren (3) und vollautomatisiertes Fahren (4). Bei den drei erstgenannten Stufen übernimmt das System für einen gewissen Zeitraum und/oder in spezifischen Situationen Teilaufgaben der Fahraufgabe. Der Fahrer ist aber mindestens als Kontrollorgan vorhanden. Für die letzte Stufe des vollautomatisierten Fahrens (4) gehen [14] davon aus, dass das Fahrzeug frei navigiert und kein Fahrer (als Rückfallebene) benötigt wird.

Im Bereich des Gütertransports existieren fahrerlose Transportsysteme auch schon auf geringen Automatisierungsstufen. Mit einer Zwischenstufe zwischen (3) und (4) ist eine weitere relevante Ausprägung in der Transportpraxis zu beobachten: Das Fahrzeug ist hochautomatisiert und fahrerlos, eine freie Navigation erfolgt nicht. Häufig findet ein tele-operiertes Fahren statt, bei dem ein Operator das Fahrzeug von einer Zentrale aus fernsteuert.

18.3.2 Anwendungsfälle des autonomen Gütertransports

Assistierte und teilautomatisierte Systeme sind heute schon zum großen Teil in Serienfahrzeugen im Einsatz. Sie übernehmen über einen gewissen Zeitraum und/oder in spezifischen Situationen die Längs- und/oder Querverführung des Fahrzeuges. Bei den assistierten Systemen erfolgt eine Warnung des Fahrers, bei den teilautomatisierten Systemen übernimmt

das System die Regelung [3]. Durch eine Kontrollinstanz, im Straßenverkehr der Fahrer, wird das Fahrzeug permanent überwacht. Die bekanntesten Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind das Antiblockiersystem (ABS) und das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP). Nach einem schweren Unglück sind seit November 2013 Spurwechsel- und -halteassistenten sowie Abstandsregeltempomaten frühzeitig für Neufahrzeuge verpflichtend geworden. Weitere Systeme sind in der Entwicklung oder bereits serienreif, wie Kippschutzsysteme, Abbiege- oder Einparksysteme. Sie zielen vor allem darauf ab, den Fahrer auf der Bahnführungsebene und der Stabilisierungsebene zu entlasten.

Hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge können darüber hinaus frei navigieren, sie sind situations- und infrastrukturunabhängig. Vollautomatisierte Systeme kommen ohne Fahrer aus. Es werden nicht nur Aktivitäten auf der Navigationsebene vom Fahrroboter mit übernommen, sondern auch diejenigen Aktivitäten, die notwendig sind, um das System wieder in einen risikominimalen Zustand zu versetzen, wenn Komponenten ausfallen.

Aus der Perspektive von Güterverkehr und Logistik stehen hier daher weniger die technologischen Lösungen für die Stabilisierungs- und Bahnführungsebene im Mittelpunkt. Vielmehr interessieren mögliche Anwendungsfälle mit und ohne Fahrer bzw. freier Navigation. Daher werden folgende Ausdifferenzierungen in Anwendungsfällen näher betrachtet:

1. **AutobahnpiLOT** als hochautomatisiertes Fahren mit Fahrer und freier Navigation,
2. **Vehicle-on-Demand** als vollautomatisierte Fahrt ohne Fahrer und mit freier Navigation,
3. **Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Follow-me-Fahrzeug** als hochautomatisiertes Fahren ohne Fahrer und ohne freie Navigation (fehlender Anwendungsfall 3/4),
4. **Valet-Parken** als hochautomatisiertes Fahren ohne Fahrer und ohne freie Navigation (fehlender Anwendungsfall 3/4).

Im Folgenden werden die Anwendungsfälle vorgestellt und erste Argumente für und gegen den gewählten Autonomiegrad in Logistik und Güterverkehr aufgeführt. Es wird jeweils geprüft, inwieweit die Anwendungsfälle im Güterverkehrssystem mit den „Use Cases des Autonomen Fahrens“ (s. Kap. 2) im Individualverkehr deckungsgleich formuliert werden und wodurch sich Unterschiede und daraus andere Umsetzungsvoraussetzungen ergeben.

18.3.3 AutobahnpiLOT mit Fahrer und freier Navigation

Der AutobahnpiLOT bezeichnet den Anwendungsfall, in dem ein Fahrroboter zum Einsatz kommt, der Fahrer aber jederzeit verfügbar ist. Der Fahrer übergibt die Stabilisierungsebene und die Bahnführungsebene idealerweise unter Angabe einer Zieladresse (und damit auch die Navigation) an den Fahrroboter. Der Einsatz eines AutobahnpiLOTen ist zwischen Autobahnauffahrt und -ausfahrt angedacht. Der Fahrer übernimmt bei unklaren Fahrsituationen (z. B. Baustellen).

Der Nutzen des Autobahnpiloten wird vor allem in der Reduzierung von Unfällen und einem besseren Verkehrsfluss gesehen. Insbesondere bei Stau oder zähfließendem Kolonnenverkehr, aber auch bei langen, eintönigen Fahrten und durch den weiter zunehmenden Termindruck sind die Fahrer häufig an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. Neben der Entlastung des Fahrers von stressbehafteten Fahrsituationen wird Arbeitszeit frei, die für andere Tätigkeiten genutzt werden kann. Hier gibt es Überlegungen, auch dispositive Tätigkeiten wie die Tourenplanung oder das Fuhrparkmanagement zu dezentralisieren.

Ein derartiger Einsatzfall ist bereits erprobt. Scania stellte im Jahr 2013 einen Lkw vor, der bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h „selbstständig beschleunigen, bremsen und lenken“ konnte [15]. Im Jahr 2014 ließ Daimler einen Lkw bis zu 85 km/h autonom auf einem gesperrten Autobahnabschnitt zwischen anderen Fahrzeugen fahren [16].

Der konzipierte Autobahnpilot entspricht einer vollautomatisierten Fahrt. Aufgrund von Sicherheitsbedenken ist allerdings ein Verfügbarkeitsfahrer vorgesehen, sodass nur von einer hochautomatisierten Fahrt gesprochen werden kann. Die Einsatzhöchstgeschwindigkeit und die höhere maximal zulässige Gesamtmasse erfordern in ihrer Kombination andere Sicherheitskonzepte als im Individualverkehr.

Veränderungen werden vor allem beim Berufsbild des Fahrers erwartet. Bisher lernt er viel über die Fahrzeugtechnik und Ladungssicherung. Übernimmt der Fahrer weiterhin die technische Überprüfung des Fahrzeugs? Welche ökonomischen und ökologischen Einsparungen wären mit dem neuen Konzept verbunden?

18.3.4 Vehicle-on-Demand als Autobahnfahrt ohne Fahrer mit freier Navigation

Vehicle-on-Demand entspricht am ehesten dem Anwendungsfall, der im Bereich des Gütertransports als autonom, dezentral gesteuertes FTS/FTF bekannt ist. Ein Fahrersitz ist nicht vorgesehen. Allerdings kann sich in dem in Kap. 2 skizzierten Anwendungsfall das Fahrzeug bis zu einer Geschwindigkeit von bis zu 120 km/h und auch in unbekannten Szenarien bewegen.

Es spricht einiges dafür, dass der Anwendungsfall „Vehicle-on-Demand“ den Wunschvorstellungen der Unternehmen nach autonomen Fahrzeugen im Güterverkehr sehr nahekommt: Der gut die Landessprache sprechende Fahrer, der bereit ist, die weiten Autobahnfahrten mit langen Abwesenheitszeiten bzw. unregelmäßigen Einsatzzzeiten für einen geringen Lohn zu übernehmen, ist immer seltener zu finden. Übermüdete Lkw-Fahrer sind der häufigste Grund für schwere Unfälle. Das Andocken und das Manövrieren in engen Belieferungssituationen ist grundsätzlich für den Fahrer keine einfache Aufgabe.

Der Einsatz von Automatisierungstechnik könnte also von großem Nutzen sein. Allerdings wird sich die Freigabe aller Szenarien für schwere Lkw, insbesondere aufgrund von Sicherheitsbedenken und notwendigen Änderungen in der Supply Chain (s. Abschn. 18.4), noch einige Zeit hinauszögern.

Mittelfristig eher realisierbar scheint der Autobahnpilot ohne Fahrer und mit freier Navigation zwischen Rendezvous-Punkten, beispielsweise zwischen Autohöfen auf Autobahnen, oder zwischen gut angebundenen Gewerbegebieten. Die Realisierungswahrscheinlichkeit dieses Anwendungsfalls könnte durch folgende Erweiterungskonzepte erhöht werden:

Sicherheitsbedenken gegenüber einem fehlenden Fahrer auf der Rückfallebene könnten durch separate Zu- und Abfahrten für autonome Fahrzeuge verringert werden, da Begegnungsfälle mit anderen Fahrzeugen auf ein Minimum reduziert werden würden. Durch die Nutzung einer eigenen Fahrspur (*dedicated lane*) durch autonome, gekoppelte Fahrzeuge könnten diese vermieden werden. Gleichzeitig könnte diese separate Fahrspur Ausgangspunkt für ein erweitertes Konzept mit alternativer Antriebstechnologie bilden, wenn diese Spur beispielsweise mit einer Oberleitung zur elektrischen Versorgung ausgestattet ist.

Die Kopplung von Fahrzeugen (*Platooning*) würde die Ausgangskonzeption, in der ein Verfügbarkeitsfahrer im vorausfahrenden Fahrzeug als Rückfallebene zur Verfügung steht, mit dem Erweiterungskonzept, in dem Fahrzeuge autonom ohne Fahrer fahren, kombinieren und die Vorteile beider Konzepte nutzen. Über ein Softwaresystem sind die Kolonnenfahrzeuge zusammengeschaltet. Für die sogenannte elektronische Deichsel bei hohen Geschwindigkeiten sprechen neben der besseren Ausnutzung der Straßeninfrastruktur vor allem die durch die Verringerung des Luftwiderstands erzielbaren Kraftstoffeinsparungen und Emissionsreduzierungen.

Mit der sogenannten elektronischen Deichsel wurden bereits seit Mitte der 1990er-Jahre mehrere Tests durchgeführt (siehe z. B. die europäischen Projekte „CHAUFFEUR I und II“, „Safe Road Trains for the Environment (SARTRE)“, „Cooperative mobility solution for supervised platooning (COMPANION)“, das kalifornische „PATH-Programm“, das deutsche „KONVOI-Projekt: Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektrisch gekoppelten Lkw-Konvois auf Autobahnen“, das japanische „ITS Projekt“ der New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)). In diesen Projekten fuhren mehrere Lkw bzw. ein Konvoi von führendem Lkw und folgenden Pkw bis zu 90 km/h sicher bei einem minimalen Abstand von vier Metern. Die Systeme basieren auf Radarsensoren, Stereokameras, dreidimensionalen Karten und meist auf den Datenaustausch mit anderen Fahrzeugen. Die bisherigen Versuche erfolgten immer mit einem Fahrer im Führungsfahrzeug und teilweise mit oder ohne Verfügbarkeitsfahrer in den Folgefahrzeugen. Es existieren auch bereits erste Ideen für ein fahrerloses Führungsfahrzeug.

In der Regel bauen diese Projekte auf bereits erprobter Technik auf: Die in Serien-Lkw verbauten Adaptive Cruise Control-Systeme dienen der Abstandskontrolle. Die Datenübertragung zwischen Führungs- und Folgefahrzeug erfolgt häufig mittels WLAN oder Infrarot.

Die ermittelten Kraftstoffeinsparungen bzw. CO₂-Minderungspotenziale fielen in Abhängigkeit der gewählten Vehicle-to-Vehicle (V2V)-Kommunikation (bei „versetztem Fahren“), der Art und des Aufbaus des Führungsfahrzeugs und der Folgefahrzeuge, des Abstands, der Geschwindigkeit sowie der Straßen- und Umweltbedingungen (Belag, Temperatur, Steigungen, Höhenlage) unterschiedlich aus. Sie betrugen um die fünf Prozent beim Führungs-Lkw und zehn bis 15 Prozent bei den Folge-Lkw [17].

18.3.5 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Follow-Me-Fahrzeug

In dem in Kap. 2 vorgestellten Anwendungsfall übernimmt das Fahrzeug als Vollautomat immer dann, wenn die Szenerie freigegeben ist. Der Fahrer ist immer dabei und kann gegebenenfalls die Fahrzeugführung übernehmen. Im Grunde ist es eine Ausweitung des Autobahnpiloten hinsichtlich der freigegebenen Szenerien und der zulässigen Geschwindigkeit und kommt dem autonomen Fahren sehr nahe.

Dieser Anwendungsfall ist aus wirtschaftlicher Perspektive nur dann interessant, wenn der begleitende Fahrer in dieser Zeit wertschöpfenden Tätigkeiten nachgehen kann. Gerade auf der sogenannten letzten Meile könnte die nächste Zustellung administrativ bereits während der Fahrt vor- bzw. nachbereitet werden. Derartige Fahrzeugkonzepte wären aber auch für den Einsatz im Personenwirtschaftsverkehr denkbar, beispielsweise für Tätigkeiten in der Altenpflege, in der Versicherungsvertretung etc., die ebenfalls mit Dokumentations- und Verwaltungstätigkeiten verbunden sind.

Als eine Vorstufe für einen Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer kann die bereits im Jahr 2011 vorgestellte Konzeptstudie „EmiL“ für ein teilautonomes Zustellfahrzeug dienen [18]. Bei diesem Fahrzeugkonzept muss der Zusteller nicht immer ein- und aussteigen, sondern kann über das Mobiltelefon das Fahrzeug anweisen, in Schrittgeschwindigkeit neben ihm herzufahren (Follow-me-Funktion). Bei allen unbekannten Situationen (z. B. Einmündungen, Kreuzungen) ist zusätzlich der DriveStick-Modus vorgesehen, mit dem bis zu sechs km/h schnell gefahren werden kann. Durch die Nutzung einer lokalen WLAN-Verbindung wird einem Signalabbruch, wie er bei GPS-Verbindungen befürchtet wird und auftreten kann, entgegengewirkt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte eine Einsparung an täglicher Zustellzeit von 40 Minuten ermittelt werden. Das typische Verletzungsrisiko durch Verdrehen und Umknicken beim Aussteigen wird verringert.

18.3.6 Valet-Parken – Valet delivery

Das Valet-Parken bezeichnet den Anwendungsfall, in dem der Fahrroboter das Fahrzeug an einen zuvor zugewiesenen freien Parkplatz autonom navigiert. Im vorgestellten Konzept in Kap. 2 wird davon ausgegangen, dass dies auch im öffentlichen Raum bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h möglich sein könnte. Ein Beispiel wäre die autonome Fahrt vom Wohnstandort des Fahrers zu einem definierten Parkplatz. Dieser Anwendungsfall ist für den Güterverkehr allerdings kaum vorstellbar, da es selten reservierte Lkw-Parkplätze mit einer Anbindung über das Nebenstraßennetz gibt.

Viel eher denkbar ist der Fall, dass in engen Innenstädten und in häufig nicht für große Lkw ausgelegten Anlieferzonen von Industrie und Handel der Fahrroboter das Einparken des Fahrzeugs oder das Andocken an die Rampe autonom übernimmt. Dadurch könnten teure Bagatellschäden verhindert werden. Der Fahrer wird von stressbehafteten Fahraufgaben entlastet, insbesondere dann, wenn er zugleich noch für die ermüdende, lange Auto-

bahnfahrt zuständig ist. Valet delivery könnte aber auch dabei helfen, dass die Fahrer ihre Ruhezeiten einhalten können, wenn die „Last-Last-Mile“ ohne ihr Zutun abgewickelt werden könnte.

Ein anderer Anwendungsfall könnte die Baustellenbelieferung sein. Bei großen Bauvorhaben werden immer häufiger im Umfeld der Baustelle sogenannte Wartezonen für Lkw vorgehalten. Beispielsweise könnten die Abläufe optimiert werden, wenn sich die Fahrer bei größeren Betongussaktionen auf die Pendelfahrt konzentrieren könnten und die Wartezeiten entfallen. Der Fahrroboter übernimmt die Fahrt zwischen Wartestelle und Bauplatz.

Die Umsetzung hängt rechtlich sehr stark von der zwischen Wartestelle und Einsatzstelle gegebenen Entfernung und konkreten Szenerie ab. Ansonsten scheint die Umsetzung eher eine mentale als eine technische Herausforderung zu sein. Insbesondere aus der Perspektive des Fahrers, der dann in Szenerien zum Einsatz kommt, in dem ihm per se unterstellt wird, dass er sein Arbeitsgerät nicht beherrscht.

18.4 Veränderungen in der Supply Chain durch einen höheren Automatisierungsgrad im Gütertransport

Der systematische Nachvollzug der Veränderungen in der Supply Chain durch einen höheren Automatisierungsgrad im Gütertransport erfolgt entlang der in Abb. 18.1 dargestellten generischen Supply Chain. Jede Supply Chain bzw. Lieferkette besteht aus einer Aneinanderreihung der Aktivitäten „Rohstoffgewinnung“, „Verarbeitung/Produktion“, „Handel“ und den dazwischen stattfindenden logistischen Prozessen „Warenausgang (Umschlag)“, „Transport“ und „Wareneingang (Umschlag)“. Darüber hinaus ist unter heutigen Bedingungen die Produktions- und die Filiallogistik ebenso interessant, wenn es um Veränderungsprozesse aufgrund des nicht mehr vorhandenen Fahrers geht, da dort sehr viele sogenannte Added-Value-Services von den Logistik-Dienstleistern erbracht werden.

Der „Transport“ erfordert neben dem Fahren selbst von dem Fahrer die Kontrolle des Fahrzeugs, die Routenplanung sowie die Dokumentation und weitere administrative Tätigkeiten (Warenbegleitpapiere). Diese sind im grenzüberschreitenden Verkehr noch umfangreicher (Zollabwicklung). Beim hochautomatisierten, fahrerlosen bzw. beim vollautomatisierten Fahren würde das häufige Problem der Lenk- und Ruhezeitüberschreitungen obsolet und Touren könnten anders geplant werden. Wenn der Transport hochautomatisiert erfolgt, wird erwartet, dass der Fahrer andere Aufgaben in dieser Zeit übernimmt. Er kann sich dann der Routenplanung, dem Fuhrparkmanagement oder der eigenen Erholung widmen [20].

Es kann also gleichzeitig zu einer Dezentralisierung und Parallelisierung von Funktionen kommen. Die Nutzung der Transportzeit für weitere Tätigkeiten ist allerdings nicht neu. Beispielsweise wurde die Behandlung von Postsendungen früher in Zügen vorgenommen (Postzug), Gleiches kann im Ausland beispielsweise auch bei den mobilen Depots (z. B. umgebaute Doppeldeckerbusse, „Floating Warehouse-Systeme“) beobachtet werden.

Grundsätzlich hat der Fahrer die Fahrzeugbe- und -entladung zu überwachen und teilweise sogar selbst durchzuführen. Im Warenausgang ist er für die Überprüfung der Fracht-

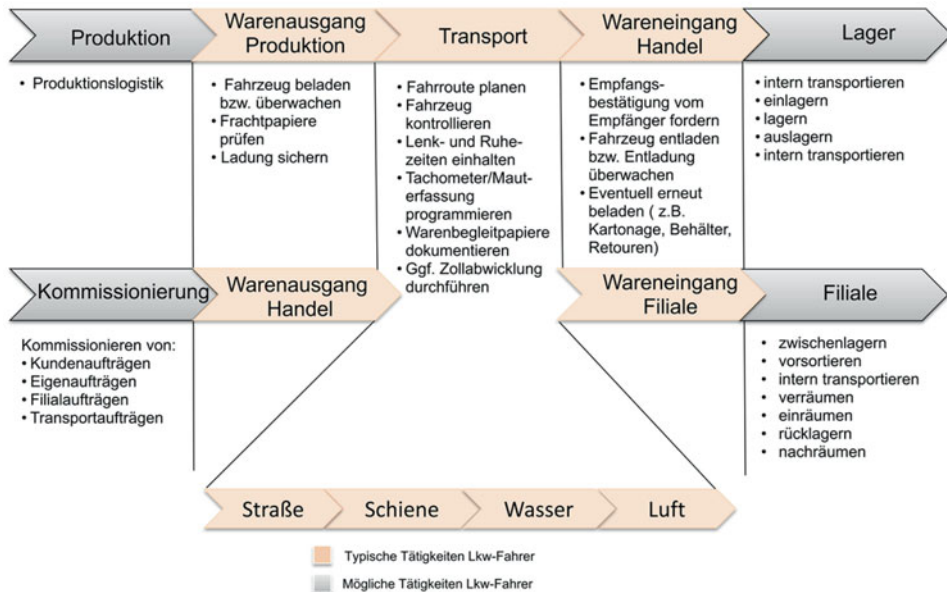


Abb. 18.1 Exemplarische fahrerrelevante Tätigkeiten einer generischen Supply Chain (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf [19])

papiere und die Ladungssicherung zuständig. Im Wareneingang hat er eine Empfangsbestätigung zu fordern.

Im Bereich des Warenein- und -ausgangs sind heute Fahrer in vielen Lieferketten für die Entladung des Fahrzeugs zuständig. Ihre Aufgabe endet häufig an der Laderampe, teilweise aber erst nach dem Einräumen, Rücklagern oder Nachräumen am Band oder sogar nach Vorsortierung, internem Transport und der Verräumung der Waren in die Regale (teilweise in Zwischenlager oder Puffer). Wie früher ist es bei einigen Paket- und Briefzustellern Usus, dass der Fahrer die Kommissionierung der Aufträge selbst übernimmt.

Im Bereich der Produktion wären Einsatzfälle denkbar, beispielsweise im Werkverkehr, wo – ähnlich wie im innerbetrieblichen Bereich – Transportaufträge ausgeschrieben werden und sich autonome Lkw darum „bewerben“ und den Transportauftrag nach vordefinierten Kriterien gewinnen können. Hierfür wäre weder eine zentrale Leitsteuerung noch Wegfindung notwendig. Teilweise existieren bereits Güterschleusen, sodass im Falle des Gefahrenübergangs keine Personen anwesend sein müssen.

Würde der Fahrer das Fahrzeug nicht mehr „begleiten“, müssten diese Tätigkeiten von anderen übernommen werden. Die Unternehmen müssten wieder eigene Beschäftigte für diese Tätigkeiten einstellen bzw. anlernen. Denkbar wäre aber auch, dass sich für die Logistik-Dienstleister hier noch ein weiteres Geschäftsmodell ergibt. Es kann also wieder zu einer Aufwertung von Arbeit allgemein und der Schaffung von lokaler Arbeit vor allem im urbanen Raum kommen. In anderen Fällen wäre es aber auch denkbar, dass der Automatisierungsgrad im Warenein- und -ausgang weiter zunimmt.

Veränderungen in den Transportsystemen selbst sind vor allem an der Schnittstelle zwischen unbemannter und bemannter Fahrt zu erwarten sowie im Aufgabenprofil der Fahrer. Die sich ergebenden prozessualen Veränderungen im Bahn- und Schiffsverkehr sowie für das Tätigkeitsspektrum der Menschen scheinen nicht so gravierend zu sein. Der Fahrer entfällt und wird durch einen Fahrroboter ersetzt. Die restliche Technik von Bahn und Schiff stehen bisher unter einem Veränderungsvorbehalt. Allerdings könnten neue Berufsbilder entstehen, wenn beispielsweise im Seeverkehr der Sicherheitsaspekt gegen Angreifer höher gewichtet wird als die Navigation.

18.5 Erste einzelwirtschaftliche Einschätzungen von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette

Fehlendes Fahrpersonal, energiesparende Fahrweise, hohe Zuverlässigkeit und effiziente Unfallvermeidung sind aus einzelwirtschaftlicher Perspektive gewichtige Gründe, autonome Systeme in der Gütertransportkette einzusetzen. In einigen Industrien ist der Materialfluss inzwischen vom Wareneingang über die Produktionsstraßen bis hin zum Warenausgang hochautomatisiert und fahrerlos gestaltet und weist damit keine Unterbrechungen und keine Liegezeiten auf. Auch die Beschickung und Entnahme aus den Lägern erfolgt in einigen Branchen hochautomatisiert und fahrerlos. Teilweise sind die Steuerungen von Lager und Produktion aufeinander abgestimmt und reichen vom automatisierten Wareneingang zum automatisierten Warenausgang.

Mit der Entwicklung der Radio Frequency Identification (RFID)-Technologie und der Wiederentdeckung der alten Idee von Leonardo da Vinci, von der Natur zu lernen (Bionik), wurde die Debatte um Selbststeuerung inspiriert und führte zu einer intensiven Diskussion um Dezentralisierung und Autonomie der Entscheidungsfindung technischer Systeme. Unterstützt durch die technologischen Entwicklungen von kostengünstigen Sensoren und internetgestützten Softwaresystemen hat der Automatisierungsgrad daher immer weiter zugenommen. Die neuesten Systeme in Produktion und Lager setzen auf die Selbststeuerung (Internet der Dinge) der Fahrzeuge und Fördersysteme, die autonom auf veränderte Arbeitsanforderungen, Zustände und Umfeldbedingungen reagieren können.

Ausgehend von der innerbetrieblich in bestimmten Branchen stark vorangeschrittenen Automatisierung von FTS/FTF ist mit einer weiteren Verschiebung der menschlichen Aktivitäten hin zu konzeptionellen und überwachenden Tätigkeiten zu rechnen. Durch den Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen im gesamten logistischen System ist damit zu rechnen, dass in vielen Supply Chains Prozesse reorganisiert werden müssen (s. Abschn. 18.4). Allerdings wird die Automatisierung wie bisher verstärkt in einzelnen Branchen zunehmen, da Aufwand und Nutzen nicht überall in einem angemessenen Verhältnis stehen werden und sich gerecht verteilen lassen.

Innerhalb des Transportsystems im öffentlichen Raum würden das Entfallen des Fahrers und/oder dessen veränderte Rolle zu zusätzlichen Schnittstellen führen, die gestaltet werden müssen. Das Zu- und Aussteigen des Fahrers bedingt zusätzliche Halte. Im innerbetrieb-

lichen Bereich gibt es beispielsweise mit den Kommissionierern bereits umfangreiche Erfahrungen. In den Verkehrssystemen liegen diese Erfahrungen nur bedingt vor. Im Seeverkehr ist es beispielsweise durchaus üblich, dass beim Hafeneinlauf ein Hafenkapitän das Steuer übernimmt. Im Straßengüterverkehrssystem ist bisher der Begegnungsverkehr erprobt, wo in aller Regel der Auflieger bzw. Hänger gewechselt wird und nicht der Fahrer. Diese Systeme haben viele Vorteile wie schnelle Transferzeiten der Waren und Güter und damit die Ausweitung der produktiven Zeiten der Fahrzeuge. Zudem verbessern sich die Arbeitsbedingungen für die Fahrer, die täglich zu ihrer Niederlassung zurückkehren. In der Praxis funktioniert dies jedoch nur in großen Netzen bzw. auf paarigen Relationen und mit vertrauenswürdigen und zuverlässigen Partnern. Dies gilt nicht nur für die Pünktlichkeit, sondern insbesondere auch hinsichtlich der Ladungssicherung. Die größte Verbreitung haben diese Systeme bisher bei den großen Integratoren bzw. KEP-Dienstleistern mit standardisierten Sendungen gefunden.

Für die Umsetzung von fahrerlosen Transportketten im Straßengüterverkehr sind also neben der Frage von technischer Kompatibilität der autonomen Fahrzeuge mit der Infrastruktur und mit anderen Fahrzeugen oder auch mit Platooning-Lkw immer auch Kosten- und Haftungsfragen im Transportrecht zu klären.

Kommt es zu Schäden an der Ware oder am Fahrzeug aufgrund von Systemausfällen, könnte die Produkthaftung greifen (s. im Detail Kap. 25). Daraus folgt, dass die Fahrroboter bestehend aus Hardwarekomponenten (Sensoren, Prozessoren und Aktoren) und Softwareelementen so aufgebaut werden müssen, dass mögliche Schäden den jeweiligen Komponenten und damit deren Produzenten direkt zurechenbar sind.

18.6 Erste gesamtwirtschaftliche Einschätzungen von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette

Auch aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive könnten automatisierte Systeme einen Lösungsansatz für strukturelle Defizite im heutigen Verkehrswesen leisten. In Zeiten knapper öffentlicher Haushalte ist künftig nicht mit einem deutlichen Ausbau von Verkehrsinfrastruktur, insbesondere von Schiene und Binnenschiff, zu rechnen.

Mit dem automatisierten Fahren könnte die vorhandene Straßeninfrastrukturkapazität durch den geringeren Platzbedarf und durch die gleichmäßigere Geschwindigkeit mindestens verdoppelt werden. Darüber hinaus könnte ein Beitrag zum Klimaziel geleistet werden, da automatisiertes Fahren den Treibstoffverbrauch reduziert. Bereits heute leisten Fahrerassistenzsysteme (FAS) einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung von Unfällen. Deren Anzahl könnte durch hoch- bzw. vollautomatisierte Fahrzeuge weiter verringert werden, da sie Stauenden erkennen können, riskante Überholmanöver vermeiden und auch keine Geisterfahrten unternehmen. Allerdings sind die rechtlichen Haftungsfragen, wenn es dann doch zu einem Unfall käme, noch nicht vollständig gelöst.

Im Falle des Platooning könnte im Führungsfahrzeug ein professioneller Fahrer zum Einsatz kommen, so wie es in den meisten Projekten auch angedacht ist. Dies hätte den

Vorteil, dass sich beispielsweise auch ungeübte oder weniger belastbare Langstreckenfahrer (Fahranfänger, Ältere) in eine Kolonne einordnen könnten. Dies würde jedoch bedingen, dass Güter- und Personenverkehrsfahrzeuge miteinander kommunizieren könnten.

Allerdings liefert nicht nur der Technikdeterminismus gewichtige Gründe gegen automatisierte Straßenfahrzeuge: Effizienzerhöhungen im Straßenverkehr rufen Konflikte mit den Massentransportmitteln hervor. Automatisiertes Platooning steht in direkter Konkurrenz mit der Bahn, wie zuvor schon der Lang-Lkw. Auch wenn es derzeit in Deutschland einen Berufskraftfahrermangel gibt, so würde doch die Anzahl an Berufskraftfahrern insgesamt abnehmen, und in anderen Ländern würden aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive dringend benötigte Arbeitsplätze entfallen.

Auch die Akzeptanz der Bevölkerung ist gegenüber vollautomatisierten Systemen beschränkt – nicht zuletzt aufgrund regelmäßiger Berichte von in Fahrzeugen ausgefallenen mechanischen oder elektronischen Bauteilen oder aus Angst vor abreißenden Datenverbindungen. Autonome Fahrzeuge müssen zudem mit einer entsprechenden, zuverlässigen Software (Künstlichen Intelligenz) ausgestattet sein, die auf alle Eventualitäten reagieren kann – insbesondere dort, wo Menschen und Tiere auf den Straßen unterwegs sind.

Aus rechtlicher Perspektive stellen Fahrroboter außerhalb der Werkshallen eine Neuheit da. Bisherige FTS/FTF wurden nach der Maschinenrichtlinie behandelt, mit entsprechenden Ausgestaltungen von Sicherheits- und Personenschutzkonzepten. Eine Ausweitung des Aktionsraums (privat/öffentlich) und der Einsatzgeschwindigkeit (Schrittgeschwindigkeit bis Autobahnfahrt) der Systeme könnte neue bzw. eine Anpassung der bestehenden rechtlichen Regelungen notwendig machen.

Für den Einsatz von autonomen Fahrzeugen im Straßenverkehr wird gefordert, die rechtlichen Einschränkungen durch die „Wiener Straßenverkehrskonvention“ abzuschaffen, die vorsieht, dass ein Fahrer jederzeit die Kontrolle über sein Fahrzeug behalten müsse. Hier gibt es inzwischen eine neuere Entwicklung in den Vereinigten Staaten, deren Rechtsprechung insofern angepasst wurde, als sichergestellt ist, dass das System „can be overridden or switched off by the driver“. Sollte sich diese Rechtsauffassung auch in Europa durchsetzen, würde dies bedeuten, dass es immer eine übergeordnete Instanz geben muss, die in das Fahrzeug steuernd eingreifen kann. Im Bereich des Bahn-, See- und Luftverkehrs werden die Systeme heute schon so ausgelegt und für den Bahn- und Luftverkehr existieren akzeptierte übergeordnete Instanzen. Für den Straßengüterverkehr muss eine derartige Instanz erst geschaffen werden. Dafür muss die notwendige Akzeptanz hergestellt werden.

18.7 Fazit und Ausblick

Seit den 1960er-Jahren sind Fahrerlose Transportsysteme (FTS) in der innerbetrieblichen Logistik in Deutschland im Einsatz. Allerdings werden diese Entwicklungen weder medial noch in der Verkehrssystemforschung bisher ausreichend wahrgenommen. In der innerbetrieblichen Logistik kommen beispielsweise Transponder als Wegmarken zum Einsatz, die auch Informationen speichern können. Wenn sich Fahrzeuge im öffentlichen Raum

immer alle Umgebungsmerkmale und -besonderheiten jeder Fahrstrecke merken müssten, würden entsprechend kostenintensive Hard- und Softwaresysteme notwendig. Diese könnten vermieden werden, wenn Wegmarken bestimmte Informationen bereithielten, die nur temporär ausgelesen werden müssten. Übertragen auf das Verkehrssystem stellt sich hier die Frage, wie die Straßeninfrastruktur verändert werden müsste.

Vollautomatisiertes Fahren eröffnet die Möglichkeit, Fahrzeuge ohne menschlichen Eingriff zwischen Quelle und Ziel zu steuern. Der Fahrroboter übernimmt nicht nur die Stabilisierung und Bahnführung, sondern auch die Navigation und trägt damit auch die Verantwortung für die unfallfreie Fahrt.

Die Bestandsaufnahme hinsichtlich der Entwicklung autonomer Straßenverkehrssysteme hat deutlich gemacht, dass die Betrachtung von Personen- und Gütermobilität wesentlich integrierter erfolgen muss. Ebenso spannend wäre eine vertiefende Betrachtung der autonomen Systementwicklung im Bereich der anderen Verkehrsträger. Der Autopilot in Flugzeugen ist schon seit Langem die Regel. Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts kamen dort Systeme zur Stabilisierung zum Einsatz. Die ersten Drohnen fliegen. Die ersten Forschungsprojekte zur unbenannten Schifffahrt auf europäischer Ebene laufen. Auch die Fernsteuerung von Eisenbahnen findet bereits seit Jahren statt. Neu ist die Qualität der autonomen Entscheidungsfindung bei veränderter Umweltsituation oder neuem bzw. verändertem Fahr- bzw. Transportauftrag. Die Ausweitung der Einsatzgebiete, beispielsweise im Luftverkehr durch die Drohnen, zeigt die Notwendigkeit auf, dass sich Transportaufträge vollkommen neu über die Verkehrsträger verteilen können. Hier besteht Forschungsbedarf.

Viele spannende Einblicke und Neuerungen wären zu erwarten, wenn das große Feld des Personenwirtschaftsverkehrs näher untersucht werden würde. Ebenso wie beim Güterverkehr geht es um Mobilität in Ausübung des Berufs. Da die Raumüberwindung nur Mittel zum Zwecke der Leistungserbringung am angefahrenen Ort ist, wird die Fortbewegung selbst in den meisten Fällen sehr viel pragmatischer betrachtet als im Individualverkehr.

Die Zusammenführung der Teilszenarien von einzelnen, autonomen logistischen Prozessen zu einem Szenario einer ganzheitlich autonomen Supply Chain bzw. Lieferkette von der automatisierten Rohstoffgewinnung, über alle Produktions- und Logistikstufen hinweg bis hin zur Belieferung des Endkunden erfordert eine integrierte Betrachtung. Technologisch wurden hier in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt. Die Forschungsarbeiten müssen daher vor allem hinsichtlich des (notwendigen) Grads der Automatisierung einzelner logistischer Prozesse sowie der Feststellung von einzel- und gesamtwirtschaftlichen Nutzen und Kosten intensiviert werden.

Aufgrund der offenen rechtlichen Fragen und der fehlenden Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung und teilweise auch unter den Unternehmensentscheidern für den Einsatz autonomer Systeme im Straßengüterverkehr (und teilweise auch in den anderen Verkehrssystemen) scheint hier nur eine schrittweise Einführung sinnvoll und realistisch. Daher wird es auf die richtige kaskadische Ausgestaltung und Implementierungsstrategie ankommen. Allerdings fehlen bisher spezifische Betrachtungen der jeweiligen Umsetzungsaspekte der skizzierten Anwendungsfälle.

Auf den ersten Blick erscheint es durchaus sinnvoll, einige der derzeit diskutierten Lösungsansätze zur Kapazitätserhöhung der Infrastruktur, Ressourcenschonung und des Umweltschutzes zu kombinieren. Der Beginn der Einführung des autonomen Fahrens in geschlossenen Systemen (beispielsweise Systemverkehren) und in überschaubaren Szenarien (z. B. Autobahn, Flughafenvorfeld, Hafen) wird Vertrauensvorbehalte und fehlende Standardisierungen überwinden helfen. Die schrittweise Umsetzung des Platooning, ausgehend von bemannten Führungs- und Folgefahrzeugen, könnte die notwendige Akzeptanz in der Bevölkerung schaffen. Zu prüfen ist, ob die gleichzeitige Einführung von Oberleitungs-Lkw und damit die Schaffung einer separaten Fahrspur unter Kapazitäts- und Sicherheitsaspekten sinnvoll wäre.

Allerdings wirft auch das Platooning mehrere Anschlussfragen auf, insbesondere hinsichtlich der Entscheidungsfindung und der Nutzenverteilung: Wenn die Kraftstoffeinsparung von der Position im Konvoi abhängig ist, wer bestimmt über den Platz in der Kette? Wenn der Konvoi ohne Fahrer in den Folgefahrzeugen fahren würde, wer bezahlt den Fahrer im Führungsfahrzeug? Braucht der Führungsfahrer eine spezielle(re) Ausbildung gegenüber den anderen Fahrern? Vor der Einführung muss aber auch geklärt werden, wie andere Platooning-Fahrzeuge identifiziert werden könnten. Dafür müsste ein gemeinsamer Standard entwickelt werden, der auch sicherstellt, dass die anderen Fahrzeuge vertrauensvoll sind. Hier greifen der weitere Forschungsbedarf und die Handlungsempfehlungen eng ineinander.

Die Veränderungen in der Supply Chain und im Güterverkehr zeigen ein sehr ambivalentes Bild, das genauer untersucht werden muss. Für das Verständnis, die Bewertung und die Einordnung ist zu klären, welche technologischen Veränderungen und Herausforderungen sich für die Fahraufgabe ergeben. Zudem gilt es, die Vor- und Nachteile des Einsatzes von automatisierten gegenüber konventionellen Fahrzeugen und deren Integrationsfähigkeit in die bestehende Arbeitsumgebung genauer zu analysieren, indem hinsichtlich verschiedener Tätigkeitsprofile von Unternehmen unterschieden wird. Bisher ist die Frage unbeantwortet, was alles autonom transportiert werden kann und welcher Autonomisierungsgrad überhaupt von der Wirtschaft hinsichtlich Notwendigkeit, Kosten und Flexibilität akzeptiert werden würde.

Gleichzeitig ergeben sich aber auch neue Möglichkeiten für innovative Geschäftsmodelle, deren Konzeptualisierung und Bewertung bisher allerdings ausstehen. Auch könnten sich Alternativen für Einsatzbereiche ergeben, deren Herausforderungen bis heute ungelöst erscheinen. Ein Beispiel ist die Ver- und Entsorgung von innerstädtischen Standorten (Stichwort „City-Logistik“), die sehr konfliktträchtig und kostenintensiv ist. Der Einsatz von autonomen Straßenverkehrsfahrzeugen, gekoppelt mit weiteren Komponenten (z. B. Güterschleusen), könnte beispielsweise eine zeitliche Entzerrung der Personen- und Güterverkehrsfahrten ermöglichen.

Parallel dazu sollten jedoch auch die Chancen und Risiken der zunehmenden Automatisierung des Transports aus einer gesamtwirtschaftlichen, länderübergreifenden Perspektive genauer analysiert werden. Dazu gehören nicht nur rechtliche Fragen und Standardisierungsnotwendigkeiten, sondern auch der weitere Wegfall von Arbeitsplätzen, die

keinen höheren Bildungsabschluss voraussetzen. Hier muss eine Betrachtung von Arbeitsalternativen stattfinden. Zu wenig untersucht ist bisher auch, welche Konflikte beispielsweise zwischen dem autonomen Straßengütertransport (im Konvoi) und den Massentransportmitteln auftreten können. Zudem bedarf die Diskussion unbedingt der thematischen Erweiterung um eine ganzheitliche Umwelt- und Ressourcenbewertung.

Literatur

1. Vahrenkamp, R.: Von Taylor zu Toyota: Rationalisierungsdebatten im 20. Jahrhundert. 2. korrigierte und erw. Auflage. Josef Eul Verlag: Lohmar-Köln (2013)
2. Ullrich, G.: Fahrerlose Transportsysteme. 2. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden (2014)
3. Ullrich, G.: Effizientes Fulfillment mit Fahrerlosen Transportfahrzeugen. DS Automotion. http://www.ds-automotion.com/uploads/tx_sbdownloader/hermes.pdf (2012). Zugegriffen: 04. Juli 2014
4. Schwarz, C., Schachmanow, J., Sauer, J., Overmeyer, L., Ullmann G.: Selbstgesteuerte Fahrerlose Transportsysteme – Self Guided Vehicle Systems. Logistics Journal (2013). doi: 10.2195/lj_NotRev_schwarz_de_201312_01
5. Sauer, J., Ullmann, G.: Schlussbericht dem geförderten Vorhaben 17237 N. Dezentrale, agentenbasierte Selbststeuerung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Bundesvereinigung Logistik e.V.. http://www.bvl.de/files/441/481/17237_Schlussbericht_FTS-Selbststeuerung_20131002.pdf (2013). Zugegriffen: 27. Juli 2014
6. Hamburger Hafen und Logistik AG: Wer hat's erfunden? Hamburger Hafen und Logistik AG. <http://hhla.de/de/container/altenwerder-cta/das-projekt-agv.html> (2014). Zugegriffen: 02. Juli 2014
7. Dermuth, R.: Fahrerloser LKW in einer Molkerei. GÖTTING. <http://www.goetting.de/news/2012/molkeerei> (2013). Zugegriffen: 02. Juli 2014
8. Kerner, S.: SaLSA – Sichere autonome Logistik- und Transportfahrzeuge. Fraunhofer IML. http://www.iml.fraunhofer.de/de/themengebiete/automation_eingebettete_systeme/Forschung/salsa.html (2014). Zugegriffen: 27. Juni 2014
9. Komatsu Ltd.: Autonomous Haul System (AHS). Komatsu Ltd. <http://www.komatsu.com.au/AboutKomatsu/Technology/Pages/AHS.aspx>(2005). Zugegriffen: 02. Juli 2014
10. Wirth, N.: Zivile Drohnen heben ab – auch an der Börse? Trendlink.com. http://www.trendlink.com/aktienanalysen/aktien/zivile_Drohnen/78-Zivile_Drohnen_heben_ab_-_auch_an_der_Borse (2014). Zugegriffen: 22. Juli 2014
11. Hegmann, G.: Rolls Royce glaubt fest an Drohnenschiffe. Welt.de. <http://www.welt.de/wirtschaft/article123352845/Rolls-Royce-glaubt-fest-an-Drohnenschiffe.html> (2013). Zugegriffen: 30. Juli 2014
12. Böcker, J., Henke, C., Rustemeier, C., Schneider, T., Trächtler A.: Rail Cab – Ein Schienenverkehrssystem mit autonomen, Linearmotor getriebenen Einzelfahrzeugen. Universität Paderborn. http://www.lea.uni-paderborn.de/fileadmin/Elektrotechnik/AG-LEA/forschung/veroeffentlichungen/2007/07ETG_Henke_Rustemeier_Schneider_Boecker_Traechtler.pdf (2007). Zugegriffen: 30. Juli 2014
13. Donges, E. 1982. Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie, 2, S. 183–190
14. Gasser, T.M.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen 83. (2012)
15. Brüninghaus, C.: Scania erforscht das automatisierte Lkw-Kolonnenfahren. Springer für Professionals. <http://www.springerprofessional.de/scania-erforscht-das-automatisierte-lkw-kolonnenfahren/4909638.html> (2014). Zugegriffen: 04. Juli 2014

16. Grünweg, T.: Autonom fahrender Lkw: Laster ohne Lenker. Spiegel Online. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/autonome-lkw-neue-technik-soll-fernfahrer-entlasten-und-sprit-sparen-a-978960.html> (2014). Zugegriffen: 04. Juli 2014
17. Tsugawa, S.: Energy ITS: What We Learned and What We should Learn. Onlinepubs.trb.org. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2012/Automation/presentations/Tsugawa.pdf> (2012). Zugegriffen: 30. Juli 2014
18. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Erprobung nutzfahrzeugspezifischer E-Mobilität – EmiL. erneuerbar-mobil.de. <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/wirtschaftsverkehr-feldversuche/abschlusberichte-wirtschaftsverkehr/abschlussbericht-emil.pdf> (2011). Zugegriffen: 02. Juli 2014
19. Bieber/Deiß 2000 Bieber, D.: Schnittstellenoptimierung in der Distributionslogistik: innovative Dienstleistungen in der Wertschöpfungskette. SSOAR. http://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/9993/ssoar-2000-bieber_et_al-schnittstellenoptimierung_in_der_distributionslogistik.pdf (2000) Zugegriffen: 17. Juli 2014
20. Daimler AG: Weltpremiere: Daimler Trucks präsentiert mit autonom fahrenden „Mercedes-Benz Future Truck 2025“ den Lkw der Zukunft. daimler.com. http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/2495102_Daimler_IRRelease_03072014_de.pdf (2014). Zugegriffen: 04. Juli 2014

Marco Pavone

Content

19.1 Introduction 400

 19.1.1 Overview 400

 19.1.2 Personal urban mobility in the 21st century 400

 19.1.3 The rise of mobility-on-demand (MoD) 401

 19.1.4 Beyond MoD: autonomous mobility-on-demand (AMoD) 401

 19.1.5 Chapter contributions 402

19.2 Modeling and controlling AMoD systems 403

 19.2.1 Spatial queueing model of AMoD systems 403

 19.2.2 Approaches for controlling AMoD systems 404

 19.2.3 Comparison 407

19.3 Evaluating AMoD systems 407

 19.3.1 Case Study I: AMoD in New York City 408

 19.3.2 Case Study II: AMoD in Singapore 409

19.4 Future research directions 412

 19.4.1 Future research on modeling and control 412

 19.4.2 Future research on AMoD evaluation 414

19.5 Conclusions 414

 19.5.1 Acknowledgments 415

References 415

M. Pavone (✉)
Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics, USA
pavone@stanford.edu

19.1 Introduction

19.1.1 Overview

This chapter discusses the operational and economic aspects of autonomous mobility-on-demand (AMoD) systems, a transformative and rapidly developing mode of transportation wherein robotic, self-driving vehicles transport passengers in a given environment. Specifically, AMoD systems are addressed along three dimensions: (1) modeling, that is analytical models capturing salient dynamic and stochastic features of customer demand, (2) control, that is coordination algorithms for the vehicles aimed at throughput maximization, and (3) economic, that is fleet sizing and financial analyses for case studies of New York City and Singapore. Collectively, the models and methods presented in this chapter enable a rigorous assessment of the *value* of AMoD systems. In particular, the case study of New York City shows that the current taxi demand in Manhattan can be met with about 8,000 robotic vehicles (roughly 70 percent of the size of the current taxi fleet), while the case study of Singapore suggests that an AMoD system can meet the personal mobility needs of the *entire* population of Singapore with a number of robotic vehicles roughly equal to 1/3 of the current number of passenger vehicles. Directions for future research on AMoD systems are presented and discussed.

19.1.2 Personal urban mobility in the 21st century

In the past century, *private* automobiles have dramatically changed the paradigm of *personal urban mobility* by enabling *fast* and *anytime* point-to-point travel within cities. However, this paradigm is currently challenged due to a combination of factors such as dependency on oil, tailpipe production of greenhouse gases, reduced throughput caused by congestion, and ever-increasing demands on urban land for parking spaces [1]. In the US, urban vehicles consume more than half of the oil consumed by *all* sectors [2], and produce 20 percent of the total carbon dioxide emissions [3, 4]. Congestion has soared dramatically in the recent past, due to the fact that construction of new roads has not kept up with increasing transportation demand [5]. In 2011, congestion in metropolitan areas increased urban Americans' travel times by 5.5 billion hours (causing a 1 percent loss of US GDP [6]), and this figure is projected to increase by 50 percent by 2020 [6]. Parking compounds the congestion problem, by causing additional congestion and by competing for urban land for other uses. The problem is even worse on a global scale, due to the combined impact of rapid increases in urban population (to reach 5 billion, more than 60 percent of the world population, by 2030 [7]), worldwide urban population density, and car ownership in developing countries [1]. As a result, private automobiles are widely recognized as an *unsustainable solution for the future of personal urban mobility* [1].

19.1.3 The rise of mobility-on-demand (MoD)

The challenge is to ensure the same benefits of privately-owned cars while removing dependency on non-renewable resources, minimizing pollution, and avoiding the need for additional roads and parking spaces. A lead to a solution for this problem comes from realizing that most of the vehicles used in urban environments are *overengineered* and *underutilized*. For example, a typical automobile can attain speeds well over 100 miles per hour, whereas urban driving speeds are typically slow (in the 15- to 25-miles per hour range [5, 8]). Furthermore, private automobiles are parked more than 90 percent of the time [5]. Within this context, one of the most promising strategies for future personal urban mobility is the concept of *one-way vehicle sharing* using small-sized, electric cars (referred to as mobility-on-demand, or MoD), which provides stacks and racks of light electric vehicles at closely spaced intervals throughout a city [1]: when a person wants to go somewhere, she/he simply walks to the nearest rack, swipes a card to pick up a vehicle, drives it to the rack nearest to the selected destination, and drops it off.

MoD systems with electric vehicles directly target the problems of oil dependency (assuming electricity is produced cleanly), pollution, and parking spaces via higher utilization rates. Furthermore, they ensure more flexibility with respect to two-way rental systems, and provide *personal, anytime* mobility, in contrast to traditional taxi systems or alternative one-way ridesharing concepts such as carpooling, vanpooling, and buses. As such, MoD systems have been advocated as a key step toward sustainable *personal* urban mobility in the 21st century [1], and the very recent success of Car2Go (a one-way rental company operating over 10,000 two-passenger vehicles in 26 cities worldwide [9]) seems to corroborate this statement (see Figure 19.1, left).

MoD systems, however, present a number of limitations. For example, due to the spatio-temporal nature of urban mobility, trip origins and destinations are unevenly distributed and as a consequence MoD systems inevitably tend to become *unbalanced*: Vehicles will build up in some parts of a city, and become depleted at others. Additionally, MoD systems do *not* directly contribute to a reduction of congestion, as the *same* number of vehicle miles would be traveled (indeed more, considering trips to rebalance the vehicles) with the *same* origin-destination distribution.

19.1.4 Beyond MoD: autonomous mobility-on-demand (AMoD)

The progress made in the field of autonomous driving in the past decade might offer a solution to these issues. Autonomous driving holds great promise for MoD systems because robotic vehicles can rebalance themselves (eliminating the rebalancing problem at its core), autonomously reach charging stations when needed, and enable system-wide coordination aimed at throughput optimization. Furthermore, they would free passengers from the task of driving, provide a personal mobility option to people unable or unwilling to drive, and potentially increase safety. These benefits have recently prompted a number of



Fig. 19.1 Left figure: A Car2Go vehicle used in a traditional (i.e., non-robotic) MoD system. Right figure: Self-driving vehicle that Google will use in a 100-vehicle AMoD pilot project within the next two years. Image credit: Car2Go and Google.

companies and traditional car manufacturers to aggressively pursue the “AMoD technology,” with activities ranging from the design of vehicles specifically tailored to AMoD operations [10, 11], to the expected launch by Google of a 100-vehicle AMoD pilot project within the next two years [12] (see Figure 19.1, right).

Rapid advances in vehicle automation technologies coupled with the increased economic and societal interest in MoD systems have fueled heated debates about the potential of AMoD systems and their economic and societal value. How many robotic vehicles would be needed to achieve a certain quality of service? What would be the cost of their operation? Would AMoD systems decrease congestion? In general, do AMoD systems represent an economically viable, sustainable, and societally-acceptable solution to the future of personal urban mobility?

19.1.5 Chapter contributions

To answer the above questions, one needs to first understand how to *control* AMoD systems, which entails optimally routing in real-time potentially hundreds of thousands of robotic vehicles. Such routing process must take into account the spatiotemporal variability of mobility demand, together with a number of constraints such as congestion and battery recharging. This represents a networked, heterogeneous, stochastic decision problem with uncertain information, hence complexity is at its heart. Within this context, the contribution of this chapter is threefold:

1. We present a spatial queueing-theoretical model for AMoD systems capturing salient dynamic and stochastic features of customer demand. A spatial queueing model entails an exogenous dynamical process that generates “transportation requests” at *spatially-localized* queues.

2. We outline two recent, yet promising approaches for the analysis and control of AMoD systems, which leverage the aforementioned spatial queueing-theoretical model. The first approach, referred to as “lumped” approach, exploits the theory of Jackson networks and allows the computation of key performance metrics and the design of system-wide coordination algorithms. The second approach, referred to as “distributed” approach, transforms the problem of controlling a set of spatially-localized queues into one of controlling a single “spatially-averaged” queue and allows the determination of *analytical* scaling laws that can be used to select system parameters (e.g., fleet sizing).
3. We discuss two case studies for the deployment of AMoD systems in New York City and Singapore. These case studies suggest that it is much more affordable (and convenient) to access mobility in an AMoD system compared to traditional mobility systems based on private vehicle ownership.

The chapter concludes with a discussion about future directions for research, with a preliminary discussion about the potential of AMoD systems to *decrease* congestion. The results presented in this chapter build upon a number of previous works by the author and his collaborators, namely [13] for the lumped approach, [14, 15, 16, 17] for the spatial queueing-theoretical framework and the distributed approach, and [13, 18] for the case studies.

The rest of this chapter is structured as follows. Section 19.2 presents a spatial queueing model for AMoD systems and gives an overview of two complementary approaches to control AMoD systems, namely, the lumped approach and the distributed approach. Section 19.3 leverages analysis and control synthesis tools from Section 19.2 to provide an initial *evaluation* of AMoD systems for two case studies of New York City and Singapore. Section 19.4 outlines directions for future research, with a particular emphasis on (and some preliminary results for) congestion effects. Finally, Section 19.5 concludes the chapter.

19.2 Modeling and controlling AMoD systems

19.2.1 Spatial queueing model of AMoD systems

At a high level, an AMoD system can be mathematically modeled as follows. Consider a given environment, where a fleet of self-driving vehicles fulfills transportation requests. Transportation requests arrive according to an *exogenous dynamical process* with associated origin and destination locations within the environment. The transportation request arrival process and the spatial distribution of the origin-destination pairs are modeled as stochastic processes, leading to a probabilistic analysis. Transportation requests queue up within the environment, which gives rise to a network of *spatially-localized* queues dynamically served by the self-driving vehicles. Such network is referred to as “spatial queueing system.” Performance criteria include the availability of vehicles upon the request’s arrival

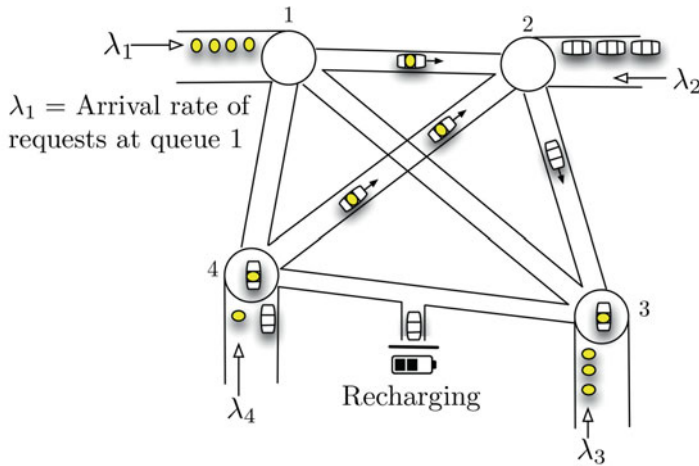


Fig. 19.2 A spatial queueing model of an AMoD system entails an exogenous dynamical process that generates “transportation requests” (yellow dots) at *spatially-localized* queues. Self-driving vehicles (represented by small car icons) travel among such locations according to a given network topology to transport passengers.

(i.e., the probability that at least one vehicle is available to provide immediate service) or average wait times to receive service. The model is portrayed in Figure 19.2.

Controlling a spatial queueing system involves a *joint task allocation and scheduling problem*, whereby vehicle routes should be dynamically designed to allocate vehicles to transportation requests so as to minimize, for example, wait times. In such a dynamic and stochastic setup, one needs to design a *closed-loop control policy*, as opposed to open-loop preplanned routes. The problem combines aspects of networked control, queueing theory, combinatorial optimization, and geometric probability (i.e., probabilistic analysis in a geometrical setting). This *precludes* the direct application of “traditional” queueing theory due to the complexity added by the spatial component (these complexities include, for example, congestion effects on network edges, energy constraints, and statistical couplings induced by the vehicles’ motion [17, 19, 20]). It also precludes the direct application of combinatorial static optimization, as the dynamic aspect of the problem implies that the problem instance is *incrementally revealed over time* and static methods can no longer be applied. As a consequence, researchers have devised a number of alternative approaches, as detailed in the next section.

19.2.2 Approaches for controlling AMoD systems

This section presents two recent, yet promising approaches for the control of spatial queueing systems as models for AMoD systems, namely the lumped approach and the distributed approach. Both approaches employ a number of relaxations and approximations to

overcome the difficulties in directly applying results from queueing (network) theory to spatial queueing models. A remarkable feature of these approaches is that they yield *formal performance bounds* for the control policies (i.e., factor of sub-optimality) and scaling laws for the quality of service in terms of model data, which can provide useful guidelines for selecting system parameters (e.g., number of vehicles). These approaches take their origin from seminal works on hypercube models for spatial queues [19], on the Dynamic Traveling Repairman problem [20, 21, 22, 23], and on the Dynamic Traffic Assignment problem [24, 25].

Alternative approaches could be developed by leveraging *worst-case* (as opposed to stochastic) techniques for dynamic vehicle routing, e.g., competitive (online) analysis [26, 27, 28]. This is an interesting direction for future research.

19.2.2.1 Lumped approach

Within the lumped approach [13], transportation requests are modeled by assuming that customers arrive at a set of stations located within a given environment¹, similar to the hypercube model [19]. The arrival process at each station is Poisson with a rate λ_i , where $i \in \{1, \dots, N\}$ and N denotes the number of stations. (Reasonable deviations from the assumption of Poisson arrivals have been found not to substantially alter the predictive accuracy of these models [19].) Upon arrival, a customer at station i selects a destination j according to a probability mass function $\{p_{ij}\}$ (Figure 19.3, left). If vehicles are parked at station i , the customer takes a vehicle and is driven to the intended destination, with a travel time modeled as a random variable T_{ij} . However, if the station is empty of vehicles, the customer immediately leaves the system. Under the assumptions of Poisson arrivals and exponentially-distributed travel times, an AMoD system is then translated into a Jackson network model through an *abstraction procedure* [13, 29], whereby one identifies the stations with single-server queues and the roads with infinite-server queues. (Jackson networks are a class of queueing networks where the equilibrium distribution is particularly simple to compute as the network has a product-form solution [30, 31]). With this identification, an AMoD system becomes a *closed Jackson network with respect to the vehicles*, which is amenable to *analytical* treatment [13] (Figure 19.3, left).

To control the network, for example, to (autonomously) rebalance the vehicles to ensure even vehicle availability, the strategy is to add *virtual customer streams* [13]. Specifically, one assumes that each station i generates “virtual customers” according to a Poisson process with rate ψ_i , and routes these virtual customers to station j with probability α_{ij} . The problem of controlling an AMoD system becomes one of optimizing over the rates $\{\psi_i\}$ and probabilities $\{\alpha_{ij}\}$ which, by exploiting the theory of Jackson networks,

¹ Alternatively, to model an AMoD system where the vehicles directly pick up the customers, one would decompose a city into N disjoint *regions* Q_1, Q_2, \dots, Q_N . Such regions would replace the notion of stations. When a customer arrives in region Q_i , destined for Q_j , a free vehicle in Q_i is sent to pick up and drop off the customer before parking at the median of Q_j . The two models are then formally *identical* and follow the same mathematical treatment.

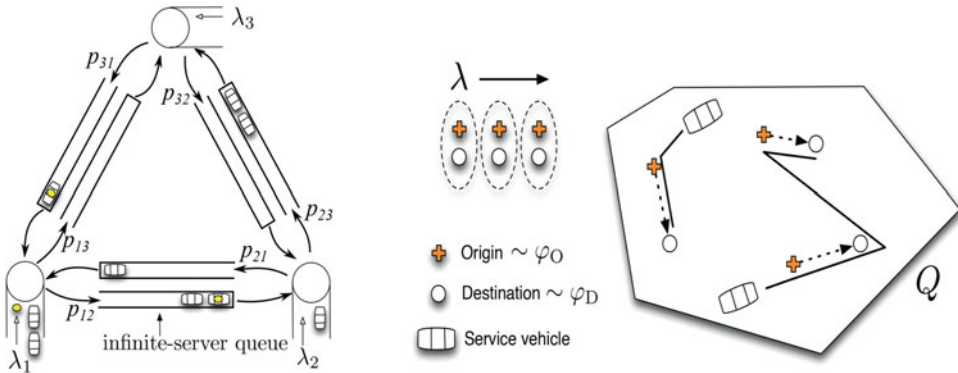


Fig. 19.3 Left figure: In the lumped model, an AMoD system is modeled as a Jackson network, where stations are identified with single-server queues and roads are identified with infinite-server queues. (Customers are denoted with yellow dots and servicing vehicles are represented by small car icons.) Some vehicles travel without passengers to rebalance the fleet. Right figure: In a distributed model of an AMoD system, a stochastic process with rate λ generates origin-destination pairs, distributed over a *continuous* domain Q .

can be cast as a *linear program* (hence, this approach extends well to *large* transportation networks). This method *encourages* coordination but does *not* enforce it, which is the key to maintaining tractability of the model [13]. The rates $\{\psi_i\}$ and probabilities $\{a_{ij}\}$ are then used as *feedforward reference signals* in a receding horizon control scheme to control in real-time an entire AMoD system [13], as done for case studies of New York City and Singapore presented in Section 19.3.

19.2.2.2 Distributed approach

The key idea behind the distributed approach [14, 15, 16, 17] is that the number of stations represents a continuum (i.e., $N \rightarrow \infty$), similar to the Dynamic Traveling Repairman problem [20, 21, 22, 23]. In other words, customers arrive at any point in a given bounded environment [15, 16], or at any point along the segments of a road map [15]. In the simplest scenario, a dynamical process generates spatially-localized origin-destination pairs (representing the transportation requests) in a geographical region $Q \subset \mathbb{R}^2$. The process that generates origin-destination pairs is modeled as a spatio-temporal Poisson process, namely, (i) the time between consecutive generation instants has an exponential distribution with intensity λ , and (ii) origins and destinations are random variables with probability density functions, respectively, φ_O and φ_D , supported over Q , see Figure 19.3 (right). The objective is to design a routing policy that minimizes the average steady-state time delay between the generation of an origin-destination pair and the time the trip is completed. By removing the constraint that customers' origin-destination pairs are localized at a finite set of points in an environment, one transforms the problem of controlling N different queues into one of controlling a single “spatially-averaged” queue. This considerably simplifies analysis and control, and allows one to derive *analytical* expressions for important design param-

ters. For example, one can show that a necessary *and* sufficient condition for stability is that the load factor

$$\rho := \lambda [E_{\varphi_O \varphi_D} [Y - X] + \text{EMD}(\varphi_O, \varphi_D)] / (vm) \quad (19.1)$$

is *strictly* less than one, where m is the number of servicing vehicles, v is the average speed of the vehicles, $E_{\varphi_O \varphi_D} [Y - X]$ is the expected distance between origin and destination locations, and $\text{EMD}(\varphi_O, \varphi_D)$ is the earth mover's distance between densities φ_O and φ_D [32], representing the minimum distance, on average, a vehicle must travel to realign itself with an *asymmetrical* travel demand [16]. Intuitively, if distributions φ_O and φ_D are imagined as describing two piles each consisting of a unit of “dirt” (i.e., earth), then $\text{EMD}(\varphi_O, \varphi_D)$ can be thought of as the minimum work (dirt \times distance) required to reshape φ_O into φ_D (see [32] for a formal definition). One can use the above formula to estimate the required fleet size to ensure stability – an example application to a case study of Singapore is presented in Section 19.3. With this approach, it is also possible to obtain formal performance bounds (i.e., factors of sub-optimality) for receding horizon control policies, in the *asymptotic* regimes $\rho \rightarrow 1^-$ (heavy-load, system saturated) and $\rho \rightarrow 0^+$ (light-load, system empty of customers) [33, 17].

19.2.3 Comparison

The lumped approach and the distributed approach are *complementary* in a number of ways. Both models provide *formal guarantees* for stability and performance. The former is more realistic (a road topology can be readily mapped into this model) and provides a natural pathway to synthesize control policies. The latter provides significant mathematical simplifications (as one only needs to study a spatially-averaged queue) and enables the determination of *analytical* scaling laws that can be used to select system parameters (e.g., fleet sizing). In the next section we exploit the interplay between these two approaches to characterize AMoD systems for case studies of New York City and Singapore.

Both approaches appear to be promising tools to systematically tackle the problem of system-wide control of AMoD systems. Several research questions, however, still need to be addressed to fulfill this objective, particularly with respect to inclusion of congestion effects (in Section 19.2.2.1, roads are modeled as infinite server queues, so the travel time for each vehicle is independent of all other vehicles), predictive accuracy, and control synthesis for complex scenarios, as detailed in Section 19.4.

19.3 Evaluating AMoD systems

Leveraging models and methods from Section 19.2, this section studies hypothetical deployments of AMoD systems in two major cities, namely New York City and Singapore.

Collectively, the results presented in this section provide a preliminary, yet rigorous evaluation of the benefits of AMoD systems based on real-world data. We mention that both case studies do not consider congestion effects – a preliminary discussion about these effects is presented in Section 19.4.

19.3.1 Case Study I: AMoD in New York City

This case study applies the lumped approach to characterize how many self-driving vehicles in an AMoD system would be required to replace the current fleet of taxis in Manhattan while providing quality service at current customer demand levels [13]. In 2012, over 13,300 taxis in New York City made over 15 million trips a month or 500,000 trips a day, with around 85 percent of trips within Manhattan. The study uses taxi trip data collected on March 1, 2012 (the data is courtesy of the New York City Taxi & Limousine Commission) consisting of 439,950 trips within Manhattan. First, trip origins and destinations are clustered into $N = 100$ stations, so that a customer is on average less than 300 m from the nearest station, or approximately a 3-minute walk. The system parameters such as arrival rates $\{\lambda_i\}$, destination preferences $\{p_{ij}\}$ and travel times $\{T_{ij}\}$ are estimated for each hour of the day using trip data between each pair of stations.

Vehicle availability (i.e., probability of finding a vehicle when walking to a station) is calculated for three cases – peak demand (29,485 demands/hour, 7–8 pm), low demand (1,982 demands/hour, 4–5 am), and average demand (16,930 demands/hour, 4–5 pm). For each case, vehicle availability is calculated by solving the linear program discussed in Section 19.2.2.1 and then applying mean value analysis [29] techniques to recover vehicle availabilities. (The interested reader is referred to [13] for further details). The results are summarized in Figure 19.4.

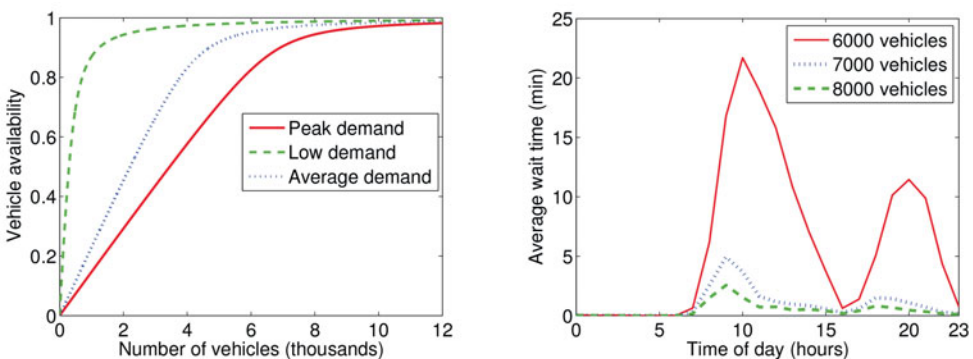


Fig. 19.4 Case study of New York City [13]. Left figure: Vehicle availability as a function of system size for 100 stations in Manhattan. Availability is calculated for peak demand (7–8 pm), low demand (4–5 am), and average demand (4–5 pm). Right figure: Average customer wait times over the course of a day, for systems of different sizes.

For high vehicle availability (say, 95 percent), one would need around 8,000 vehicles (~70 percent of the current fleet size operating in Manhattan, which, based on taxi trip data, we approximate as 85 percent of the total taxi fleet) at peak demand and 6,000 vehicles at average demand. This suggests that an AMoD system with 8,000 vehicles would be able to meet 95 percent of the taxi demand in Manhattan, assuming 5 percent of customers are impatient and leave the system when a vehicle is not immediately available. However, in a real system, customers would wait in line for the next vehicle rather than leave the system, thus it is important to determine how vehicle availability relates to customer waiting times. Customer waiting times are characterized through simulation, using the receding horizon control scheme mentioned in Section 19.2.2.1. The time-varying system parameters λ_{ij} , p_{ij} , and average speed are piecewise constant, and change each hour based on values estimated from the taxi data. Travel times T_{ij} are based on average speed and Manhattan distance between stations i and j , and self-driving vehicle rebalancing is performed every 15 minutes. Three sets of simulations are performed for 6,000, 7,000, and 8,000 vehicles, and the resulting average waiting times are shown in Figure 19.4 (right). Specifically, Figure 19.4 (right) shows that for a 7,000 vehicle fleet the peak averaged wait time is less than 5 minutes (9–10 am) and, for 8,000 vehicles, the average wait time is only 2.5 minutes. The simulation results show that high availability (90–95 percent) does indeed correspond to low customer wait time and that an AMoD system with 7,000 to 8,000 vehicles (roughly 70 percent of the size of the current taxi fleet) can provide adequate service with current taxi demand levels in Manhattan.

19.3.2 Case Study II: AMoD in Singapore

This case study discusses an hypothetical deployment of an AMoD system to meet the personal mobility needs of the *entire* population of Singapore [18]. The study, which should be interpreted as a thought experiment to investigate the potential benefits of an AMoD solution, addresses three main dimensions: (i) minimum fleet size to ensure system stability (i.e., uniform boundedness of the number of outstanding customers), (ii) fleet size to provide acceptable quality of service at current customer demand levels, and (iii) financial estimates to assess economic feasibility. To support the analysis, three complementary data sources are used, namely the 2008 Household Interview Travel Survey – HITS – (a comprehensive survey about transportation patterns conducted by the Land Transport Authority in 2008 [34]), the Singapore Taxi Data – STD – database (a database of taxi records collected over the course of a week in Singapore in 2012) and the Singapore Road Network – SRD – (a graph-based representation of Singapore’s road network).

19.3.2.1 Minimum fleet sizing

The minimum fleet size needed to ensure stability is computed by applying equation (19.1), which was derived within the distributed approach. The first step is to process the HITS, STD, and SRD data sources to estimate the arrival rate λ , the average origin-

destination distance $E_{\varphi_O \varphi_D} [Y - X]$, the demand distributions φ_O and φ_D , and the average velocity v . Given such quantities, equation (19.1) yields that at least 92,693 self-driving vehicles are required to ensure the transportation demand remains uniformly bounded. To gain an appreciation for the level of vehicle sharing possible in an AMoD system of this size, consider that at 1,144,400 households in Singapore, there would be roughly one shared car every 12.3 households. Note, however, that this should only be seen as a lower bound on the fleet size, since customer waiting times would be unacceptably high.

19.3.2.2 Fleet sizing for acceptable quality of service

To ensure acceptable quality of service, one needs to increase the fleet size. To characterize such increase, we use the same techniques outlined in Section 19.3.1, which rely on the lumped approach. Vehicle availability is analyzed in two representative cases. The first is chosen as the 2–3 pm bin, since it is the one that is the closest to the “average” traffic condition. The second case considers the 7–8 am rush-hour peak. Results are summarized in Figure 19.5 (left). With about 200,000 vehicles, availability is about 90 percent on average, but drops to about 50 percent at peak times. With 300,000 vehicles in the fleet, availability is about 95 percent on average and about 72 percent at peak times. As in Section 19.3.1, waiting times are characterized through simulation. For 250,000 vehicles, the maximum wait time during peak hours is around 30 minutes, which is comparable with typical congestion delays during rush hour. With 300,000 vehicles, peak wait times are reduced to less than 15 minutes, see Figure 19.5 (right). To put these numbers into perspective, in 2011 there were 779,890 passenger vehicles operating in Singapore [35]. Hence, this case study suggests that an AMoD system can meet the personal mobility need of the entire population of Singapore with a number of robotic vehicles roughly equal to 1/3 of the current number of passenger vehicles.

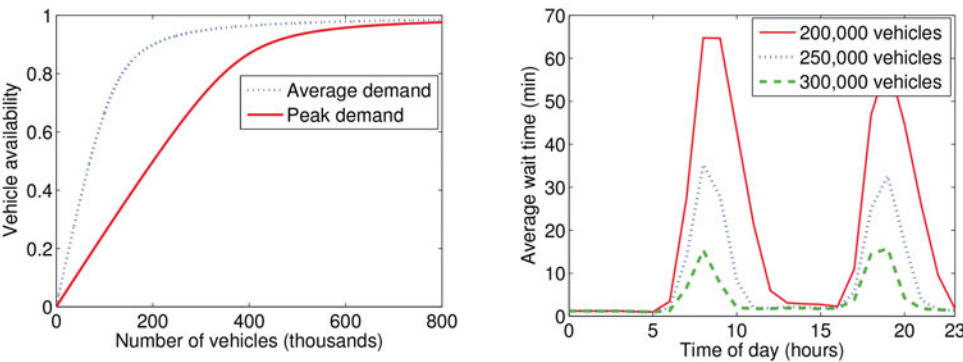


Fig. 19.5 Case study of Singapore [18]. Left figure: Performance curve with 100 regions, showing the availability of vehicles vs. the size of the system for both average demand (2–3 pm) and peak demand (7–8 am). Right figure: Average wait times over the course of a day, for systems of different sizes.

19.3.2.3 Financial analysis of AMoD systems

This section provides a preliminary, yet rigorous economic evaluation of AMoD systems. Specifically, this section characterizes the total mobility cost (TMC) for users in two competing transportation models. In System 1 (referred to as *traditional system*), users access personal mobility by purchasing (or leasing) a private, human-driven vehicle. Conversely, in System 2 (the AMoD system), users access personal mobility by subscribing to a shared AMoD fleet of vehicles. For both systems, the analysis considers not only the explicit costs of access to mobility (referred to as cost of service -COS-), but also hidden costs attributed to the time invested in various mobility-related activities (referred to as cost of time -COT-). A subscript $i = \{1, 2\}$ will denote the system under consideration (e.g., COS_1 denotes the COS for System 1).

Cost of service: The cost of service is defined as the sum of all explicit costs associated with accessing mobility. For example, in System 1, COS_1 reflects the costs to individually purchase, service, park, insure, and fuel a private, human-driven vehicle, which, for the case of Singapore, are estimated for a mid-size car at \$18,162/year. For System 2, one needs to make an educated guess for the cost incurred in retrofitting production vehicles with the sensors, actuators, and computational power required for automated driving. Based upon the author's and his collaborators' experience on self-driving vehicles, such cost (assuming some economies of scale for large fleets) is estimated as a one-time fee of \$15,000. From the fleet-sizing arguments of Section 19.3.2.2, one shared self-driving vehicle in System 2 can effectively serve the role of about four private, human-driven vehicles in System 1, which implies an estimate of 2.5 years for the average lifespan of a self-driving vehicle. Tallying the aforementioned costs on a fleet-wide scale and distributing the sum evenly among the entire Singapore population gives a COS_2 of \$12,563/year (see [18] for further details about the cost breakdown). According to COS values, it is more affordable to access mobility in System 2 than System 1.

Cost of time: To monetize the hidden costs attributed to the time invested in mobility-related activities, the analysis leverages the Value of Travel Time Savings (VTTS) numbers laid out by the Department of Transportation for performing a cost-benefit analysis of transportation scenarios in the US [36]. Applying the appropriate VTTS values based on actual driving patterns gives $COT_1 = \$14,460/\text{year}$ (which considers an estimated 747 hours/year spent by vehicle owners in Singapore in mobility-related activities, see [18]). To compute COT_2 , this analysis prices sitting comfortably in a shared self-driving vehicle while being able to work, read, or simply relax at 20 percent of the median wage (as opposed to 50 percent of the median wage which is the cost of time for driving in free-flowing traffic). Coupling this figure with the fact that a user would spend no time parking, limited time walking to and from the vehicles, and roughly 5 minutes for a requested vehicle to show up (see Section 19.3.2.2), the end result is a COT_2 equal to \$4,959/year.

Total mobility cost: A summary of the COS, COT, and TMC for the traditional and AMoD systems is provided in Table 19.1 (note that the average Singaporean drives 18,997 km in a year). Remarkably, combining COS and COT figures, the *TMC for AMoD systems is roughly half of that for traditional systems*. To put this into perspective, these savings

Table 19.1 Summary of the financial analysis of mobility-related cost for traditional and AMoD systems for a case study of Singapore [18].

	Cost [USD/km]			Yearly cost [USD/year]		
	COS	COT	TMC	COS	COT	TMC
Traditional	0.96	0.76	1.72	18,162	14,460	32,622
AMoD	0.66	0.26	0.92	12,563	4,959	17,522

represent about one third of GDP per capita. Hence, this analysis suggests that it is much more affordable to access mobility in an AMoD system compared to traditional mobility systems based on private vehicle ownership.

19.4 Future research directions

This chapter provided an overview of modeling and control techniques for AMoD systems, and a preliminary evaluation of their financial benefits. Future research on this topic should proceed along two main dimensions: efficient control algorithms for increasingly more realistic models and eventually for real-world test beds, and financial analyses for a larger number of deployment options and accounting for positive externalities (e.g., increased safety) in the economic assessment. Such research directions are discussed in some details next, with a particular emphasis on the inclusion of congestion effects and some related preliminary results.

19.4.1 Future research on modeling and control

A key direction for future research is the inclusion of congestion effects. In AMoD systems, congestion manifests itself as constraints on the road capacity, which in turn affect travel times throughout the system. To include congestion effects, a promising strategy is to study a modified lumped model whereby the infinite-server road queues are changed to queues with a *finite* number of servers, where the number of servers on each road represents the *capacity* of that road [13]. This approach is used in Figure 19.6 on a simple 9-station road network, where the aim is to illustrate the impact of autonomously rebalancing vehicles on congestion. Specifically, the stations are placed on a square grid, and joined by 2-way road segments, each of which is 0.5 km long. Each road consists of a single lane, with a critical density of 80 vehicles/km. Each vehicle travels at 30 km/hour in free flow, which means the travel time along each road segment is 1 minute in free flow. Figure 19.6 plots the vehicle and road utilization increases due to rebalancing for 500 randomly generated systems (where the arrival rates and routing distributions are randomly generated). The routing algorithm for the rebalancing vehicles is a simple open-loop strategy based on the

linear program discussed in Section 19.2.2.1. The x-axis shows the ratio of rebalancing vehicles to passenger vehicles on the road, which represents the inherent imbalance in the system. The red data points represent the increase in average road utilization due to rebalancing and the blue data points represent the utilization increase in the most congested road segment due to rebalancing. It is no surprise that the average road utilization rate is a linear function of the number of rebalancing vehicles. However, remarkably, the maximum congestion increases are much lower than the average, and are in most cases zero. This means that while rebalancing generally increases the number of vehicles on the road, *rebalancing vehicles mostly travel along less congested routes and rarely increase the maximum congestion in the system*. This can be seen in Figure 19.6 bottom left, where rebalancing clearly increases the number of vehicles on many roads but not on the most congested road segment (from station 6 to station 5).

The simple setup in Figure 19.6 suggests that AMoD systems would, in general, not lead to an increase in congestion. A particularly interesting and intriguing research direction is to devise routing algorithms for AMoD systems that indeed lead to a *decrease* in congestion with current demand levels (or even higher). A promising strategy relies on the idea that if AMoD systems are implemented such that passengers are given precise pickup times and trips are staggered to avoid too many trips at the same time, congestion may be reduced. Passengers may still spend the same amount of time between requesting a vehicle and

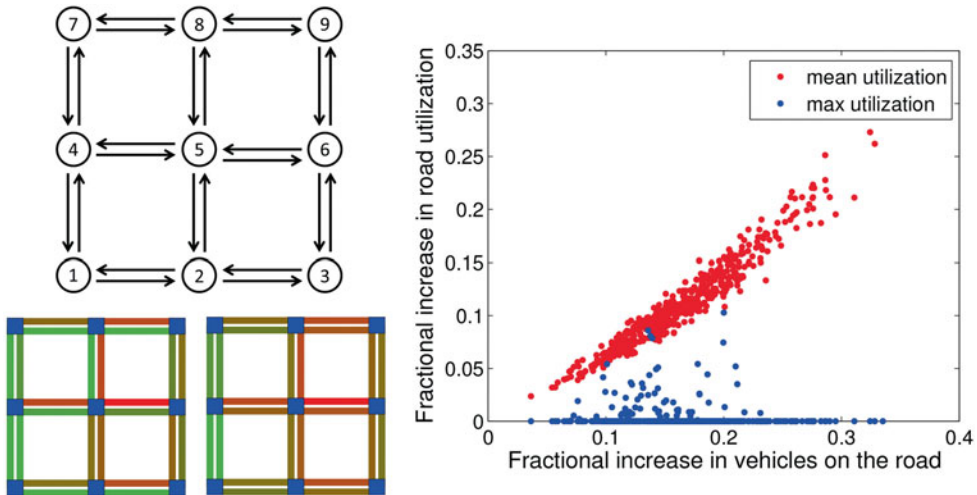


Fig. 19.6 Congestion effects in AMoD systems [13]. Top left: Layout of the 9-station road network. Each road segment has a capacity of 40 vehicles in each direction. Bottom left: The first picture shows the 9-station road network without rebalancing. The color on each road segment indicates the level of congestion, where green is no congestion, and red is heavy congestion. The second picture is the same road network with rebalancing vehicles. Right: The effects of rebalancing on congestion. The x-axis is the ratio of rebalancing vehicles to passenger vehicles on the road. The y-axis is the fractional increase in road utilization due to rebalancing.

arrival at their destination, but the time spent waiting for the vehicle could be used for productive work as opposed to being stuck in traffic. Specifically, for highly congested systems, vehicle departures can be staggered to avoid excessive congestion, and the routing problem is similar to the simultaneous departure and routing problem [37].

Besides congestion, several additional directions are open for future research. As far as modeling is concerned, those include (i) analysis in a time-varying setup (e.g., with periodically time-varying arrival rates), (ii) inclusion of mesoscopic and microscopic effects into the models (e.g., increased throughput due to platooning or automated intersections), and (iii) more complex models for the transportation requests (e.g., time windows or priorities). On the control side, those include (i) inclusion of recharging constraints in the routing process, (ii) control of AMoD systems as part of a *multi-modal* transportation network, which should address synergies between AMoD and alternative transportation modes and interactions with human-driven vehicles, and (iii) deployment of control algorithms on real-world test beds.

19.4.2 Future research on AMoD evaluation

The AMoD evaluation presented in Section 19.3 already showed that AMoD systems might hold significant financial benefits. Remarkably, such financial benefits might be even larger when one also accounts for the positive externalities of an AMoD system, e.g., improved safety, freeing up urban land for other uses, and even creating a new economy based on infotainment systems onboard the self-driving vehicles. Such additional benefits, however, have not been thoroughly characterized yet and require additional analyses. Another research direction involves the evaluation of AMoD systems for more complex deployment options, e.g., as a last-mile solution within a multi-modal transportation system, or with a more sophisticated service structure, e.g., multiple priority classes.

19.5 Conclusions

This chapter overviewed recent results regarding the modeling, control, and evaluation of autonomous mobility-on-demand systems. Case studies of New York City and Singapore suggest that it would be much more affordable (and more convenient) to access mobility in an AMoD system compared to traditional mobility systems based on private vehicle ownership. More studies are however needed to devise efficient, system-wide coordination algorithms for complex AMoD systems as part of a multi-modal transportation network, and to fully assess the related economic benefits.

19.5.1 Acknowledgments

The author acknowledges the collaboration with Emilio Frazzoli (MIT), Rick Zhang (Stanford), Kyle Treleaven (MIT), Kevin Spieser (MIT) and Daniel Morton (SMART center) on the results presented in this chapter.

References

1. W. J. Mitchell, C. E. Borroni-Bird, and L. D. Burns. *Reinventing the Automobile: Personal Urban Mobility for the 21st Century*. The MIT Press, Cambridge, MA, 2010.
2. International Energy Outlook 2013. Technical report, U.S. Energy Information Administration, 2013.
3. The Emissions Gap Report 2013 – UNEP. Technical report, United Nations Environment Programme, 2013.
4. U.S. Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. Online: <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/refs.html>, 2014.
5. Our Nation's Highways: 2011. Technical report, Federal Highway Administration, 2011.
6. D. Schrank, B. Eisele, and T. Lomax. TTI's 2012 urban mobility report. Technical report, Texas A&M Transportation Institute, Texas, USA, 2012.
7. UN. World urbanization prospects: The 2011 revision population database. Technical report, United Nations, 2011.
8. A. Santos, N. McGuckin, H. Y. Nakamoto, D. Gray, and S. Liss. Summary of travel trends: 2009 national household travel survey, 2011.
9. CAR2GO. CAR2GO Austin. Car Sharing 2.0: Great idea for a great city. online: <http://www.car2go.com/austin/en/>, 2011.
10. J. Motavalli. G.M. EN-V: Sharpening the focus of future urban mobility. Online: <http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/03/24/g-m-en-v-sharpening-the-focus-of-future-urban-mobility>. The New York Times, 24 March 2010.
11. Induct. Navia – the 100% electric automated transport. Online: <http://navya-technology.com/>, 2013.
12. Google. Just press go: designing a self-driving vehicle. Online: <http://googleblog.blogspot.com/2014/05/just-press-go-designing-self-driving.html>, 2014.
13. R. Zhang and M. Pavone. Control of robotic mobility-on-demand systems: a queueing-theoretical perspective. In *Robotics: Science and Systems Conference*, 2014.
14. M. Pavone. *Dynamic vehicle routing for robotic networks*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
15. K. Treleaven, M. Pavone, and E. Frazzoli. Models and asymptotically optimal algorithms for pickup and delivery problems on roadmaps. In *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, pages 5691–5698, 2012.
16. K. Treleaven, M. Pavone, and E. Frazzoli. Asymptotically optimal algorithms for one-to-one pickup and delivery problems with applications to transportation systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 58(9):2261–2276, 2013.
17. E. Frazzoli and M. Pavone. Multi-vehicle routing. In *Springer Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, 2014.
18. K. Spieser, K. Treleaven, R. Zhang, E. Frazzoli, D. Morton, and M. Pavone. Toward a systematic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: A case study in Singapore. In *Road Vehicle Automation*. Springer, 2014.

19. R. C. Larson and A. R. Odoni. *Urban operations research*. Prentice-Hall, 1981.
20. D. J. Bertsimas and G. J. van Ryzin. A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the Euclidean plane. *Operations Research*, 39:601–615, 1991.
21. D. J. Bertsimas and D. Simchi-Levi. A new generation of vehicle routing research: robust algorithms, addressing uncertainty. *Operations Research*, 44(2):286–304, 1996.
22. D. J. Bertsimas and G. J. van Ryzin. Stochastic and dynamic vehicle routing in the Euclidean plane with multiple capacitated vehicles. *Operations Research*, 41(1):60–76, 1993.
23. D. J. Bertsimas and G. J. van Ryzin. Stochastic and dynamic vehicle routing with general interarrival and service time distributions. *Advances in Applied Probability*, 25:947–978, 1993.
24. T. L. Friesz, J. Luque, R. L. Tobin, and B. W. Wie. Dynamic network traffic assignment considered as a continuous time optimal control problem. *Operations Research*, 37(6):893–901, 1989.
25. S. Peeta and A. Ziliaskopoulos. Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future. *Networks and Spatial Economics*, 1:233–265, 2001.
26. E. Feuerstein and L. Stougie. On-line single-server dial-a-ride problems. *Theoretical Computer Science*, 268(1):91–105, 2001.
27. P. Jaillet and M. R. Wagner. Online routing problems: Value of advanced information and improved competitive ratios. *Transportation Science*, 40(2):200–210, 2006.
28. G. Berbeglia, J. F. Cordeau, and G. Laporte. Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research*, 202(1):8–15, 2010.
29. D. K. George and C. H. Xia. Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks. *European Journal of Operational Research*, 211(1):198–207, 2011.
30. J. R. Jackson. Networks of waiting lines. *Operations Research*, 5(4):518–521, 1957.
31. J. R. Jackson. Jobshop-like queueing systems. *Management science*, 10(1):131–142, 1963.
32. L. Ruschendorf. The Wasserstein distance and approximation theorems. *Probability Theory and Related Fields*, 70:117–129, 1985.
33. M. Pavone, K. Treleaven, and E. Frazzoli. Fundamental performance limits and efficient policies for transportation-on-demand systems. In *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, pages 5622–5629, 2010.
34. Singapore Land Transport Authority. 2008 Household interview travel survey background information, 2008.
35. Land Transport Authority. Singapore land transit statistics in brief, 2012.
36. HEATCO. Harmonized European approaches for transport costing and project assessment. Online: <http://heatco.ier.uni-stuttgart.de>, 2006.
37. H. Huang and W. H. K. Lam. Modeling and solving the dynamic user equilibrium route and departure time choice problem in network with queues. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(3):253–273, 2002.

Hermann Winner, Markus Maurer

Autonomes Fahren muss sicher sein – die Legitimität dieser Forderung ist unbestritten. Doch was ist für diesen Wunschzustand alles zu beachten? Der Einstieg in diese Thematik erfolgt über die maschinelle Wahrnehmung, die schließlich als *enabling technology* für das autonome Fahren angesehen wird. Selbstverständlich ist, dass nur das, was zuverlässig erkannt wird, auch in eine sichere Fahrentscheidung umgesetzt werden kann. Lässt sich und, wenn ja, wie lässt sich sicherstellen, dass die maschinelle Wahrnehmung die für die Sicherheit erforderliche Qualität aufweist? Welche Möglichkeiten zur Qualifizierung der Wahrnehmungsleistung *onboard* bestehen, welche Grenzen lassen sich nicht überschreiten und wie sind diese für die Entwicklung des autonomen Fahrens zu bewerten? Diese Fragen sind Kernfragen im Kapitel *Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren* von Klaus Dietmayer.

Ist es gelungen, die Anforderungen an ein autonomes Fahrzeug erfolgreich zu definieren und umzusetzen, so bleibt die Herausforderung zu verifizieren und zu validieren, ob die Anforderungen durch die vorliegende Realisierung wirklich erfüllt werden. Unter den Experten herrscht Einigkeit, dass sich autonome Fahrzeuge allein mit den heute eingesetzten Test- und Absicherungsmethoden nicht werden freigegeben lassen. Walther Wachenfeld und Hermann Winner erläutern die Herausforderungen und skizzieren Ansätze, die Bestandteile neuer Werkzeugketten für die Absicherung sein könnten, in ihrem Beitrag *Die Freigabe des autonomen Fahrens*.

Auch der Mensch ist zu Beginn seiner Karriere als Autofahrer weit entfernt von späterer Leistungsfähigkeit. Besondere Unfallhäufigkeiten bei jungen (männlichen) Fahrern zeugen davon. Mit wachsender Erfahrung verbessert sich die Sicherheit der Fahrerinnen und Fahrer deutlich, Menschen lernen sicher zu fahren. Walther Wachenfeld und Hermann Winner diskutieren unter dem Titel *Lernen autonome Fahrzeuge?* auf Basis intensiver Literaturstudien, inwieweit maschinelles Lernen den Anforderungen an die Sicherheit für autonomes Fahren genügen kann.

Ausgehend von der zentralen Norm ISO 26262 diskutiert Andreas Reschka, wann autonome Fahrzeuge im Allgemeinen und im Speziellen in den Use-Cases in einem sicheren

Zustand sind, wie Degradationen sicherer gestaltet werden könnten und welche Anforderungen an ein *Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge* bestehen.

Kai Rannenberg zeigt in seinem Beitrag *Erhebung und Nutzbarmachung zusätzlicher Daten – Möglichkeiten und Risiken* auf, dass offene Schnittstellen und Kommunikation mit Teilnehmern außerhalb des Fahrzeugs zwar aus Sicht der Funktionalität, der Absicherung und des Funktionsnachweises hilfreich sein mögen, dass sie aber im Sinne des Datenschutzes und der Datenintegrität sehr bedenklich sein können. Er wird argumentieren, dass maschinelle Autonomie auch mit einem Verlust an Privatheit verbunden sein kann, aber vielleicht nicht notwendigerweise verbunden sein sollte.

Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren

Klaus Dietmayer

Inhaltsverzeichnis

20.1 Einleitung 420

20.2 Maschinelle Wahrnehmung 422

 20.2.1 Umfang und Ausprägung 422

 20.2.2 Ausprägung von Umgebungsmodellen 424

20.3 Methoden zum Umgang mit Unsicherheiten der maschinellen Wahrnehmung 425

 20.3.1 Unsicherheitsdomänen 425

 20.3.2 Zustandsunsicherheit 426

 20.3.3 Existenzunsicherheit 429

 20.3.4 Klassenunsicherheit 431

 20.3.5 Zusammenfassende Bewertung 432

20.4 Folgerungen für die maschinelle Wahrnehmungsleistungsprädiktion 433

20.5 Zusammenfassung 436

Literatur 437

K. Dietmayer (✉)
Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Deutschland
klaus.dietmayer@uni-ulm.de

20.1 Einleitung

Beim hoch- und vollautomatisierten Fahren ist es aufgrund der dem Fahrer zugebilligten Nebenaufgaben notwendig, dass das Fahrzeug Einschränkungen seiner maschinellen Wahrnehmung sowie Funktionseinschränkungen darauf aufbauender Verarbeitungsmodule selbst erkennt und darauf adäquat reagiert. Während man aufgrund von Simulatorstudien beim hochautomatisierten Fahren von realistischen Übergabezeiten an den Fahrer von fünf bis zehn Sekunden ausgeht [1], [2], bevor dieser die Fahraufgabe wieder sicher übernehmen kann, wäre beim vollautomatisierten Fahren der Mensch überhaupt keine Rückfallebene mehr. Das Fahrzeug müsste bei Funktionseinschränkungen vollständig selbst einen eigensicheren Zustand erreichen können. Aber auch mögliche Übergabezeiten von fünf Sekunden und mehr erfordern eine weitgehende, wenn auch zeitbegrenzte Autonomie des Fahrzeugs, um diesen Zeitraum unter allen Umständen sicher überbrücken zu können.

Um diesen Grad der Autonomie erreichen zu können, muss das Fahrzeug seine Umgebung wahrnehmen, geeignet interpretieren und daraus kontinuierlich sichere Handlungen ableiten und ausführen. Technisch wird diese Aufgabe durch einzelne, aufeinander aufbauende Verarbeitungsmodule gelöst. Eine vereinfachte Darstellung der Zusammenhänge zeigt Abb. 20.1.

Die maschinelle Wahrnehmung der Fahrumgebung erfolgt durch verschiedene am Fahrzeug verbaute Sensoren wie Kameras oder Radarsensoren. Hinzu kommen in der Regel weitere Informationen über das statische Fahrumfeld aus hochgenauen digitalen Karten. Sie sind allerdings nur dann nutzbar, wenn das Fahrzeug seine genaue Position kennt. Somit ist als weiteres Funktionsmodul auch eine Eigenlokalisierung des Fahrzeugs für den Kartenabgleich erforderlich. Das Ergebnis der maschinellen Wahrnehmung ist ein dynamisches Fahrzeugumfeldmodell, in dem das eigene Fahrzeug sowie alle anderen Verkehrsteilnehmer durch individuelle Bewegungsmodelle repräsentiert sind. Ferner sollten alle relevanten

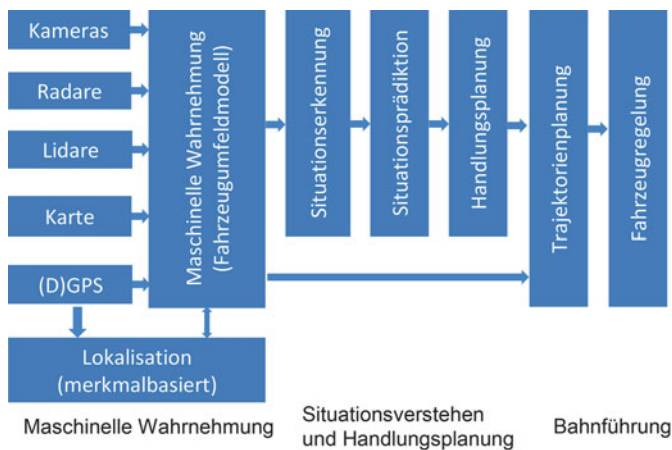


Abb. 20.1 Grobstruktur der Informationsverarbeitung bei der automatischen Fahrzeugführung

Infrastruktureinrichtungen wie Verkehrsschilder und Lichtsignalanlagen, aber auch strukturierende Elemente wie Verkehrsinseln und Bordsteine sowie Fahrbahnmarkierungen für die Fahrstreifeneinteilung, gesperrte Flächen oder Fußgängerüberwege in Form von Zebrastreifen enthalten sein.

Aufbauend auf diesem Fahrzeugumfeldmodell werden dann bei der Situationserkennung alle Einzelkomponenten in Beziehung zueinander gesetzt, um aus den Abhängigkeiten der Einzelelemente ein maschinelles Szenenverständnis zu errechnen. Im darauf aufbauenden Modul der Situationsprädiktion werden verschiedene mögliche zeitliche Entwicklungen der Szene, auch Episoden genannt, vorausberechnet und hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit des Eintretens bewertet. Eine Episode kennzeichnet damit in diesem Beitrag eine mögliche spezifische zeitliche Entwicklung einer erkannten Verkehrsszene, wobei der Zeithorizont im Bereich von wenigen Sekunden liegt. Auf Basis dieser situativen Informationen ermittelt das darauf aufbauende Modul eine übergeordnete Handlungsplanung. Sie könnte beispielsweise das Umfahren eines Hindernisses oder das Überholen eines langsameren Fahrzeugs vorsehen. Zur Ausführung der Pläne werden dann mögliche Trajektorien des Fahrzeugs mit einem typischen Zeithorizont von drei bis fünf Sekunden berechnet und hinsichtlich Sicherheit und Komfort bewertet. Die nach vorgebbaren Kriterien optimale Trajektorie wird von der Fahrzeugregelung ausgeführt. Der beschriebene Bearbeitungsprozess wird fortlaufend, in der Regel schritthaltend mit der sensorischen Erfassung erneut durchgeführt, um auf Aktionen und Reaktionen anderer Verkehrsteilnehmer reagieren zu können.

Die Beschreibung dieser technischen Prozesskette macht deutlich, dass ein Ausfall der maschinellen Wahrnehmung umgehend zu so großen Unsicherheiten in der Situationsbewertung führen würde, dass eine sichere Handlungsplanung und Handlungsausführung nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Degradation des maschinellen Szenenverständnisses und der darauf aufbauenden Handlungsplanung und Handlungsausführung ist situationsabhängig; eine zuverlässige Prädiktion wird typisch aber zwei bis drei Sekunden nicht übersteigen können. Es ist somit evident, dass eine Mindestwahrnehmungsleistung schon beim hochautomatisierten Fahren aufgrund der deutlich größeren Übergabezeiträume an den Fahrer notwendig ist. Ein Komplettausfall der maschinellen Wahrnehmung ist unter allen Umständen zu vermeiden, wobei dies natürlich auch für die darauf aufbauenden Module und die Fahrzeugregelung mit ihren Sensoren und Aktoren gilt, die aber nicht im Fokus dieses Beitrags stehen.

Es stellt sich daher die Frage, ob Einschränkungen in der Funktion der maschinellen Wahrnehmung erkennbar oder sogar präzisierbar sind und, falls ja, über welchen Zeitraum. In den folgenden Abschnitten werden hierzu nach dem Stand der Technik bekannte methodische Ansätze diskutiert und darauf aufbauend mögliche Forschungsfragen abgeleitet.

20.2 Maschinelle Wahrnehmung

20.2.1 Umfang und Ausprägung

Die maschinelle Wahrnehmung hat, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, die Aufgabe, alle für die Funktion des automatisierten Fahrens relevanten anderen Verkehrsteilnehmer sicher zu erkennen und der Verkehrsinfrastruktur korrekt zuzuordnen. Dies ist insbesondere deshalb notwendig, da beispielsweise für einen Fußgänger am Straßenrand ein anderes Gefährdungspotenzial besteht, als wenn er einen parallel verlaufenden, abgetrennten Fußgängerweg benutzt.

Zur maschinellen Wahrnehmung werden im Fahrzeugumfeld Sensoren verwendet, die auf Kamera- sowie Radar- und/oder Lidartechnik basieren. Nähere Informationen zu der Funktion und den Bauformen dieser Sensoren sind beispielsweise in [3] zu finden. Kameras liefern ein 2-D-Abbild der 3-D-Szene in Form von hoch aufgelösten Grauwert- oder Farbbildern, aus denen bei genügendem Kontrast oder Unterschieden in der Textur einzelne Objekte mit Methoden der Bildverarbeitung extrahiert werden können. Eine Bestimmung der Objektentfernung ist mit Mono-Kameras allerdings nur mit oft zu Fehlern führenden Annahmen wie einer ebenen Fahrbahn möglich. Stereo-Kameras erlauben zwar über das Disparitätsbild auch eine Bestimmung der Objektentfernung, die Genauigkeit sinkt jedoch quadratisch mit zunehmender Entfernung. Bei den heute üblichen Basisabständen der Stereoanordnungen und Auflösung der Kameras sind Messreichweiten bis etwa 50 Meter möglich, ohne dass der Fehler so stark ansteigt, dass Funktionen hieraus keinen Nutzen mehr ziehen könnten.

Radar-, aber auch Lidarsensoren liefern hingegen vergleichsweise sehr genaue und auch hinsichtlich der Messfehler nahezu distanzunabhängige Entfernungsmessdaten. Sie können aber aufgrund der geringeren Winkelauflösung die Konturen, d. h. die Außenabmessungen von Objekten, schlechter erfassen. Dies gilt insbesondere für Radarsensoren. Zudem liefern Radar- und Lidarsensoren keinerlei Texturinformationen. Aufgrund dieser unterschiedlichen Messeigenschaften werden die unterschiedlichen Sensortypen für die Aufgabe der maschinellen Wahrnehmung in der Regel kombiniert verwendet. Man spricht dann von einer Sensordatenfusion.

Mit den fusionierten Sensordaten lassen sich bewegte und statische Objekte, aber beispielsweise auch Fahrbahnmarkierungen grundsätzlich erkennen und physikalisch vermessen. Die möglichen Messdimensionen hängen vom spezifischen Sensor-Setup ab. Typische erfassbare physikalische Messdaten sind die Abmessungen eines Objekts als Quadermodell mit Länge, Breite und Höhe sowie seine Position absolut in der Welt oder relativ zum eigenen Fahrzeug. Im Fall von bewegten Objekten kommen dann noch die Objektgeschwindigkeiten und Objektbeschleunigungen als relativ einfach bestimmbare Zustandsgrößen hinzu. Schwerer und in der Regel sehr unsicher bestimmbar aus externen Sensormessungen ist die Gierrate beziehungsweise die Kursrate anderer Verkehrsteilnehmer. Diese Größen sind ohne Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation nur für das eigene Fahrzeug zuverlässig ermittelbar.

Für die spätere Situationsbewertung und Situationsprädiktion ist allerdings nicht nur die physikalische Vermessung der Objekte notwendig, sondern auch die Kenntnis darüber, um welche Objektklasse es sich handelt. Beispielsweise unterscheiden sich ein Fußgänger und ein Motorradfahrer in ihren möglichen Bewegungsfreiheitsgraden und auch in der möglichen Bewegungsdynamik. Markierungsstreifen auf der Fahrbahn können je nach Kontext und Konstellation unterschiedliche Bedeutungen haben. Daher ist es notwendig, auch die semantische Bedeutung der erkannten Objekte aus den Sensordaten oder weiteren Informationsquellen wie einer digitalen Karte zu ermitteln. Dieser Vorgang wird im Zusammenhang mit der maschinellen Wahrnehmung als Klassifikationsschritt bezeichnet, ist aber Bestandteil der maschinellen Wahrnehmung.

Während Menschen sehr schnell und fehlerfrei den visuellen Wahrnehmungen auch semantische Bedeutung zuordnen können, ist dies für die maschinelle Wahrnehmung nach dem heutigen Stand der Technik noch eine vergleichsweise schwierige Aufgabe. Bekannte Klassifikationsverfahren basieren immer auf mehr oder weniger komplexen Modellen erwarteter Objektklassen, die entweder aus Beispielen automatisiert gelernt oder manuell vorgegeben werden. Diese Modelle weisen dann möglichst diskriminierende, mit den verfügbaren Sensoren erfassbare Merkmale auf, sodass zwischen den vorkommenden Objektklassen unterschieden werden kann. Es wird aber auch deutlich, dass vorab nicht trainierte Objektklassen mit heute bekannten Verfahren auch nicht semantisch identifiziert werden können. Aufgrund der signifikant höheren Leistungsfähigkeit haben sich lernende Klassifikationsverfahren heute weitgehend durchgesetzt.

Eine maschinelle Wahrnehmung mit semantischen Informationen ist im Kontext der Fahrerassistenzsysteme und des automatisierten Fahrens nur deshalb technisch möglich, weil der Verkehrsraum gut strukturiert und auf wenige Objektklassen beschränkt ist. Zudem ist für die Situationserkennung und Situationsprädiktion nur eine grobe Klassenunterscheidung relevant. Nach dem heutigen Stand der Technik reicht es aus, unter den bewegten Objekten zwischen den Klassen Fußgänger, Radfahrer, Personenkraftwagen und Lastkraftwagen bzw. Bussen unterscheiden zu können. Hinzu kommen noch stationäre Hindernisse, die jedoch meist zusammen mit den nicht klassifizierbaren Objekten einer Restklasse hinzugefügt werden.

Für die korrekte Zuordnung der klassifizierten Objekte zur Verkehrsinfrastruktur ist es ferner notwendig, auch Fahrstreifenmarkierungen, Sperrflächen, Haltelinien, Lichtsignalanlagen und Verkehrsschilder zuverlässig mit korrekter semantischer Bedeutung zu erkennen. Da diese komplexe Klassifikationsaufgabe heute noch nicht mit der notwendigen Zuverlässigkeit möglich ist, werden nach dem Stand der Technik unterstützend hochgenaue und umfassend attributierte digitale Karten verwendet. Hieraus kann das automatisierte Fahrzeug bei bekannter eigener Position die im Sensorsichtfeld zu erwartenden stationären Objekte sowie Markierungen inklusive semantischer Bedeutung entnehmen. Die Sensorik muss dann nur noch das Vorhandensein der Objekte verifizieren.

Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist es, dass zum einen eine hochgenaue Lokalisation des eigenen Fahrzeugs notwendig ist, für die Standard-GPS-Verfahren nicht ausreichen, und zum anderen die Karte immer aktuell sein muss. Aus diesem Grund wird man zukünf-

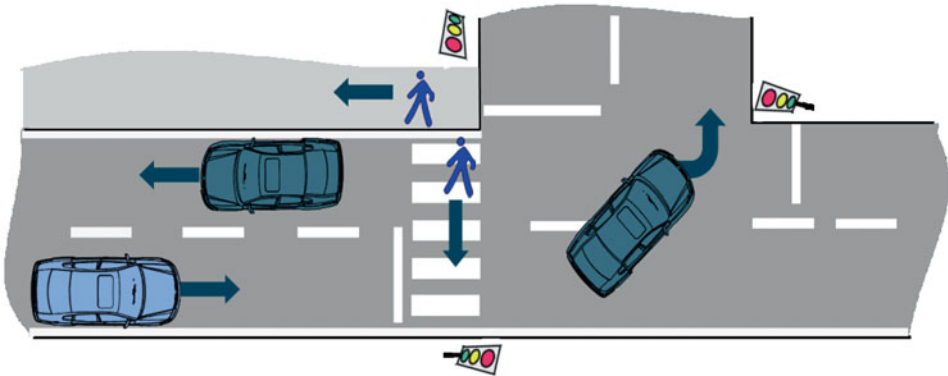


Abb. 20.2 Prinzipbild der objektbasierten Fahrumgebungsrepräsentation. Es werden alle relevanten Objekte erkannt, klassifiziert und der Infrastruktur korrekt zugeordnet

tig versuchen technische Lösungen zu entwickeln, die keine hochgenaue und aktuelle Karte mehr benötigen.

20.2.2 Ausprägung von Umgebungsmodellen

Die maschinelle Wahrnehmung mündet in ein Fahrumgebungsmodell, wobei man objektbasierte und gitterbasierte Repräsentationsformen unterscheidet. Beide Repräsentationsformen sind grundsätzlich kombinierbar.

Unter einem objektbasierten Fahrzeugumfeldmodell versteht man eine dynamische Datenstruktur, in der alle relevanten Objekte und Infrastrukturelemente in der Nähe des eigenen Fahrzeugs korrekt in Ort und Zeit in einem gemeinsamen Bezugssystem enthalten sind. Die Erfassung und zeitliche Verfolgung der Objekte und Infrastrukturelemente erfolgen wie oben erläutert fortlaufend durch geeignete, in der Regel fusionierte bordeigene Sensoren wie Kameras und Radare sowie die zusätzliche Nutzung hochgenauer digitaler Karten. Abb. 20.2 zeigt beispielhaft Komponenten, die eine Fahrumgebungsrepräsentation enthalten kann.

Welche Objekte und Strukturelemente für das automatisierte Fahren relevant sind, hängt maßgeblich von der zu bewältigenden Fahraufgabe ab, deren Komplexität beginnend mit einfachen Autobahnszenarien, über Landstraßen bis hin zum innerstädtischen Verkehr stark zunimmt. Bei der objektbasierten Repräsentation werden alle für die Repräsentation relevanten anderen Verkehrsteilnehmer, die relevanten Infrastrukturelemente sowie das eigene Fahrzeug selbst jeweils durch ein eigenes dynamisches Objektmodell, in der Regel ein zeitdiskretes Zustandsraummodell, beschrieben. Dessen Zustände wie Position, Geschwindigkeit oder auch 2-D/3-D-Objektausdehnung werden schritthaltend mit den Sensormessungen fortlaufend aktualisiert. Ferner erfolgt eine fortlaufende Erfassung der Fahrbahnmarkierungen sowie der Verkehrszeichen und des Status der Lichtsignalanlagen.

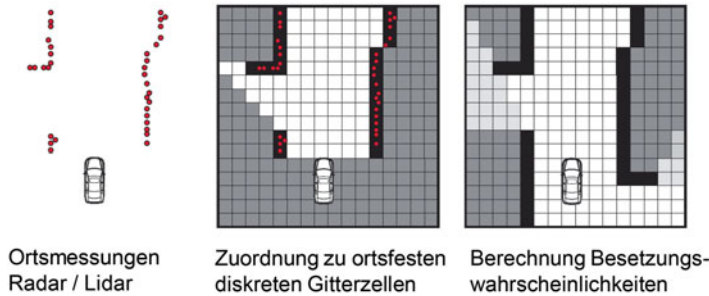


Abb. 20.3 Prinzipbild des Aufbaus einer rasterbasierten Fahrumgebungsrepräsentation. Hier sind im einfachsten Fall nur statische Hindernisse enthalten.

Eine gitterbasierte Darstellung verwendet Rasterkarten, um die Umwelt ortsfest in gleich große Zellen einzuteilen. Das Fahrzeug bewegt sich über dieses ortsfeste 2-D- oder 3-D-Gitter, und die bordautarke Sensorik liefert dann nur Informationen, ob spezifische Zellen frei sind und damit frei befahren werden können oder ob sich in der jeweiligen Zelle ein Hindernis befindet. Zudem kann auch der Zustand modelliert werden, dass über Zellen keine Informationen vorliegen. Diese Art der Darstellung eignet sich vornehmlich zur Repräsentation statischer Szenarien und statischer Hindernisse. Sie benötigt keinerlei Modellhypothesen über die zu erwartenden Objektklassen und ist daher als sehr robust gegen Modellfehler einzustufen. Abb. 20.3 zeigt die grundsätzliche Vorgehensweise. Mehr Informationen zu gitterbasierten Repräsentationen ist [4], [5], [6], [7] und [8] zu entnehmen.

20.3 Methoden zum Umgang mit Unsicherheiten der maschinellen Wahrnehmung

20.3.1 Unsicherheitsdomänen

Wie in Abschn. 20.2 beschrieben, umfasst die maschinelle Wahrnehmung unterschiedliche Aufgabenumfänge. Diese sind zum einen die Detektion von statischen und dynamischen Objekten und ihre möglichst genaue physikalische Vermessung, zum anderen aber auch die Zuordnung der korrekten semantischen Bedeutung der detektierten Objekte. Entsprechend diesen Aufgaben existieren für die maschinelle Wahrnehmung die folgenden drei Unsicherheitsdomänen:

1. Zustandsunsicherheit

Die Zustandsunsicherheit beschreibt die Unsicherheit in den physikalischen Messgrößen wie Größe, Position und Geschwindigkeit und ist eine direkte Folge der bei Sensoren prinzipiell nicht vermeidbaren Messfehler.

2. Existenzunsicherheit

Die Existenzunsicherheit beschreibt die Unsicherheit darüber, ob ein von der Sensorik erkanntes und in die Umgebungsrepräsentation übernommenes Objekt überhaupt real existiert. Fehler dieser Art können durch Unzulänglichkeiten in den Signalverarbeitungsalgorithmen oder durch Fehlmessungen der Sensoren selbst entstehen.

3. Klassenunsicherheit

Hiermit ist die Unsicherheit hinsichtlich der korrekten semantischen Zuordnung gemeint, die durch Unzulänglichkeiten der Klassifikationsverfahren bzw. nicht ausreichend gute Messdaten verursacht werden können.

Für die Anwendung des automatisierten Fahrens ist es notwendig, die Unsicherheiten bzw. Fehler in den verschiedenen Domänen zuverlässig zu erkennen und, falls möglich, sogar präzisieren zu können. Methodisch werden zur Behandlung von Unsicherheiten nach dem Stand der Technik fast ausnahmslos Verfahren basierend auf der Bayes-Theorie [10], [11], [12] oder ihrer Verallgemeinerung, der Dempster-Shafer-Theorie [16], verwendet. Sie besitzen den Vorteil, dass sie eine durchgehend probabilistische und daher weitgehend heuristikfreie Behandlung der Unsicherheitsdomänen erlauben.

Die o. g. Unsicherheitsdomänen beziehen sich im engeren Sinne zunächst nur auf die bordeigene Sensorik. Es lassen sich allerdings auch Fehler in Informationen aus einer digitalen Karte oder den durch Car2x-Kommunikation gewonnenen Daten entsprechend kategorisieren. Gerade die zuletzt genannte Car2x-Kommunikation birgt zwar durch mögliche variable Latenzzeiten bei der Übertragung und eventuell nicht genau bekannte Unsicherheitsbewertungen der Sendequellen zusätzliche Fehlereinflüsse. Die Auswirkungen lassen sich jedoch wieder den drei genannten Unsicherheitsdomänen zuordnen, sodass hierauf nicht weiter eingegangen wird.

20.3.2 Zustandsunsicherheit

Die Zustandsunsicherheit eines detektierten Objektes wird gemäß der Bayes-Theorie durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beschrieben, anhand derer der wahrscheinlichste Gesamt- bzw. Einzelzustand sowie mit gewisser Wahrscheinlichkeit auch mögliche Variationen hiervon bestimmt werden können. Im Fall einer mehrdimensionalen, normalverteilten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist die Zustandsunsicherheit durch eine Kovarianzmatrix vollständig repräsentiert.

Bei der Schätzung statischer Größen wie beispielsweise die Fahrzeugabmessungen kann deren Zustandsunsicherheit durch wiederholte Messungen immer weiter verringert werden. Der Schätzwert auf Basis der verfügbaren Messungen konvergiert gegen den wahren Wert, falls kein systematischer Sensorfehler, beispielsweise in Form eines Offsets, vorliegt. Bei der Schätzung von dynamischen, zeitveränderlichen Zuständen wie der Objektposition oder Objektgeschwindigkeit ist aufgrund der Bewegung des Objektes zwischen den Messzeitpunkten die Konvergenz gegen einen wahren Wert nicht mehr gegeben. Bei der Bewer-

tung der Güte der Zustandsschätzung wird daher gefordert, dass der Fehler im Mittel null ist und die Unsicherheit möglichst gering.

Das grundlegende Verfahren zur Behandlung von Zustandsunsicherheiten ist das allgemeine Bayes-Filter [10]. Bei ihm werden der geschätzte Zustand eines Objektes und die dazugehörige Unsicherheit durch eine mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion p (engl. probability density function, PDF) repräsentiert:

$$p_{k+1}(x_{k+1} | Z_{1:k+1}).$$

Sie hängt allgemein von allen bis zum Zeitpunkt $k + 1$ vorhandenen Messungen $Z_{1:k+1} = \{z_1, \dots, z_{k+1}\}$ ab. Dies wird durch die gewählte Schreibweise einer bedingten Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, d. h., die Wahrscheinlichkeit für den Zustand des Systems x ist bedingt durch die Messungen Z .

Das Bewegungsmodell eines durch die Sensoren erfassten Objektes für den Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen ist durch eine Bewegungsgleichung der Form

$$x_{k+1|k} = f(x_k) + v_k$$

zu beschreiben, wobei v_k eine additive Störgröße darstellt, die mögliche Modellfehler repräsentiert. Die Bewegungsgleichung drückt aus, in welchem Zustand wie Ort, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung sich das Objekt zum nächsten Zeitpunkt wahrscheinlich befindet. Alternativ kann diese Bewegungsgleichung auch durch eine Markov-Übergangswahrscheinlichkeitsdichte ausgedrückt werden:

$$f_{k+1|k}(x_{k+1} | x_k).$$

Die Markov-Übergangswahrscheinlichkeitsdichte ist letztendlich nur eine andere mathematische Schreibweise für dieselben Modellannahmen. Um die Gleichungen praktisch berechenbar zu halten, ist es üblich, eine Markov-Eigenschaft erster Ordnung vorauszusetzen. Diese Eigenschaft sagt vereinfachend aus, dass der zukünftige Zustand eines Systems nur vom zuletzt bekannten Zustand und der aktuellen Messung abhängt, nicht aber von der gesamten Historie von Messungen und Zuständen. Die Markov-Eigenschaft erster Ordnung ist damit eine vorausgesetzte Systemeigenschaft.

Im konkreten Fall hängt der prädiizierte Zustand x_{k+1} des Objektes vor dem Vorliegen der neuen Messung dann nur noch vom zuletzt ermittelten Zustand x_k ab, da dieser implizit die gesamte Messhistorie $Z_{1:k} = \{z_1, \dots, z_k\}$ enthält.

Die Vorhersage des aktuellen Objektzustandes x_k bis zum nächsten Messzeitpunkt $k + 1$ erfolgt schließlich unter Berücksichtigung der Modellannahmen anhand der Chapman-Kolmogorov-Gleichung

$$p_{k+1|k}(x_{k+1} | x_k) = \int f_{k+1|k}(x_{k+1} | x_k) p_k(x_k) dx_k.$$

Dies wird als Prädiktionsschritt des Bayes-Filters bezeichnet.

Der Messprozess der Sensoren lässt sich allgemein durch eine Messgleichung der Form

$$z_{k+1|k} = h_{k+1}(x_{k+1}) + w_{k+1},$$

beschreiben. Die Messfunktion $h(\cdot)$ beschreibt, wie Messungen und Zustandsgrößen zusammenhängen. Kann beispielsweise eine Zustandsgröße direkt gemessen werden, handelt es sich bei $h(\cdot)$ um eine Eins-zu-eins-Abbildung. Die stochastische Störgröße w_{k+1} repräsentiert hierbei einen möglichen Messfehler. Eine alternative mathematische Repräsentation der Messgleichung ist die Likelihood-Funktion

$$g(z_{k+1}|x_{k+1}).$$

Bei Vorliegen der aktuellen Messungen z_{k+1} wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Objektzustandes aktualisiert. Die Berechnung der aktuellen Schätzung des Zustands erfolgt anhand der Bayes-Formel

$$p_{k+1}(x_{k+1}|z_{k+1}) = \frac{g(z_{k+1}|x_{k+1})p_{k+1|k}(x_{k+1}|x_k)}{\int g(z_{k+1}|x_{k+1})p_{k+1|k}(x_{k+1}|x_k)dx}.$$

Dieser zweite Schritt zum Einbringen der aktuellen Messung wird als Innovationsschritt bezeichnet.

Das durch Prädiktionsschritt und Innovationsschritt kurz beschriebene rekursive Schätzverfahren wird als allgemeines Bayes-Filter bezeichnet, worauf alle heute üblichen Methoden und Implementationen der stochastischen Zustandsschätzung basieren. Neben den Prozess- und Messgleichungen benötigt das Verfahren nur eine Apriori-PDF für den Objektzustand $p_0(x_0)$ zum Zeitpunkt $k = 0$. Das Filter ist in dieser allgemeinen Form jedoch nicht effizient zu implementieren.

Unter der Annahme von normalverteilten Messsignalen sowie linearen Modellen ermöglicht das Kalman-Filter [9] eine einfache analytische Implementation des allgemeinen Bayes-Filters. Da eine Gauß-Verteilung durch ihre ersten beiden statistischen Momente, d. h. den Mittelwert sowie die zugehörige Kovarianzmatrix, vollständig beschrieben ist, stellt die zeitliche Filterung der Momente eine mathematisch exakte Lösung dar. Eine Anwendung des Kalman-Filters auf Systeme mit nichtlinearen Prozess- oder Messgleichungen lässt sich anhand des Extended-Kalman-Filters (EKF) [12] sowie des Unscented-Kalman-Filters (UKF) [15] realisieren. Während das EKF die Systemgleichungen unter Nutzung einer Taylorreihen-Approximation linearisiert, ist das Ziel des UKF eine stochastische Approximation anhand sogenannter Sigma-Punkte [15].

Unabhängig von der konkreten Implementation ist allen auf dem allgemeinen Bayes-Filter basierenden Verfahren gemein, dass sie fortlaufend ein probabilistisches Maß für die Unsicherheit der aus den Sensordaten bestimmten physikalischen Größen liefern. Hierdurch lassen sich Ausfälle von Sensoren, aber auch eine Degeneration der Leistungsfähigkeit einzelner Sensoren zuverlässig erkennen. Weichen beispielsweise Messdaten einzelner

Sensoren signifikant, d. h. außerhalb der statistisch zu erwartenden Schwankungsbreite, ab, liegt eine entsprechende Leistungsminderung vor.

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass eine Einschränkung der Sensorfunktion nur erkannt werden kann, nachdem sie aufgetreten ist. Außer Trendaussagen bei langsamer Degeneration ist keinerlei Vorhersage der zukünftigen Wahrnehmungsleistung bezogen auf die Zustandsunsicherheit möglich.

20.3.3 Existenzunsicherheit

Für die Realisierung des automatisierten Fahrens ist die Existenzunsicherheit mindestens genauso relevant wie die Zustandsunsicherheit. Sie drückt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Objekt in der Fahrumgebungsrepräsentation auch wirklich einem realen Objekt entspricht. Eine Notbremsung eines automatisierten Fahrzeugs sollte beispielsweise nur im Falle einer sehr hohen Existenzwahrscheinlichkeit eines erkannten Hindernisses ausgelöst werden.

Während die Schätzung von Zustandsunsicherheiten nach dem Stand der Technik durch Methoden der Bayes-Schätzung theoretisch fundiert erfolgt, wird die Existenzwahrscheinlichkeit in heutigen Systemen noch meist aufgrund eines heuristischen Qualitätsmaßes bestimmt. Ein Objekt gilt als bestätigt, wenn das Qualitätsmaß einen sensor- und anwendungsabhängigen Schwellwert überschreitet. Die Qualitätsmaße basieren beispielsweise auf der Anzahl der Messungen, die das Objekt bestätigt haben, oder einfach auf der Zeitspanne zwischen Initialisierung des Objektes und dem aktuellen Zeitpunkt. Häufig wird auch die Zustandsunsicherheit des Objektes (s. Abschn. 20.3.2) zur Validierung verwendet.

Ein theoretisch besser fundierter Ansatz ist die Schätzung einer wahrscheinlichkeitsbasierten Existenzwahrscheinlichkeit. Hierfür ist zunächst eine Definition der spezifischen Objektexistenz notwendig. Während in manchen Anwendungen sämtliche realen Objekte als existent betrachtet werden, kann die Objektexistenz auch auf die in der aktuellen Anwendung relevanten Objekte eingeschränkt werden. Des Weiteren ist eine Einschränkung auf die mit dem aktuellen Sensor-Setup auch detektierbaren Objekte möglich. Im Gegensatz zu einem Schwellwertverfahren ermöglicht diese Bestimmung der Existenzwahrscheinlichkeit jedoch eine wahrscheinlichkeitsbasierte Interpretationsmöglichkeit. Beispielsweise bedeutet eine Existenzwahrscheinlichkeit von 90 Prozent, dass die Messhistorie sowie das Bewegungsmuster des Objektes mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 Prozent von einem realen Objekt erzeugt wurden. Folglich kann die Handlungsplanung des automatisierten Fahrzeugs diese Wahrscheinlichkeiten bei der Bewertung von Handlungsalternativen verwenden.

Ein bekannter Algorithmus zur Berechnung einer Existenzwahrscheinlichkeit stellt das ebenfalls auf dem allgemeinen Bayes-Filter aufbauende Joint-Integrated-Probabilistic-Data-Association- (JIPDA-) Verfahren dar, das erstmals 2004 von Musicki [13] vorgestellt wurde. Es verwendet hierfür zusätzlich die als bekannt vorausgesetzten Detektions- und Falschalarmwahrscheinlichkeiten der Sensoren.

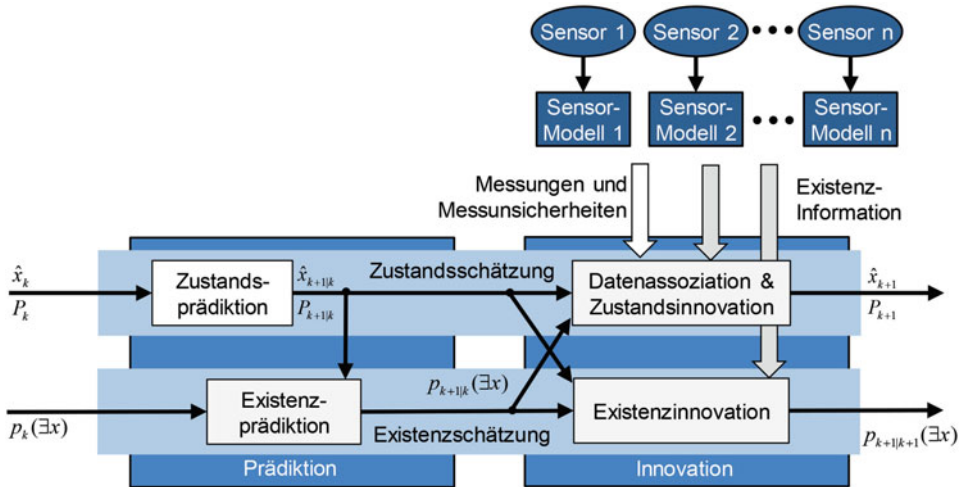


Abb. 20.4 Struktur eines JIPDA-Filters als Verkopplung zweier Markov-Ketten

Die Berechnung der aktuellen Objektexistenzwahrscheinlichkeit erfolgt analog zur Aktualisierung des Zustands im Kalman-Filter in einem Prädiktions- und einem Innovationsschritt. Die Existenzprädiktion erfolgt anhand eines Markov-Modells erster Ordnung. Die prädierte Existenz eines Objektes ist durch die Markov-Kette

$$p_{k+1|k}(\exists x) = p_S p_k(\exists x) + p_B p_k(\nexists x)$$

gegeben, wobei die Wahrscheinlichkeit p_S die Persistenzwahrscheinlichkeit des Objektes darstellt und p_B die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Objektes in den Sensor-erfassungsbereich. Folglich ist die Wahrscheinlichkeit für das Verschwinden eines Objektes gegeben durch $1 - p_S$. Im Innovationsschritt wird die Aposteriori-Existenzwahrscheinlichkeit $p_{k+1}(\exists x)$ berechnet. Sie hängt im Wesentlichen davon ab, wie viele aktuelle Messungen die Existenz des Objektes bestätigen.

Da die Persistenzwahrscheinlichkeit eines Objektes vom aktuellen Objektzustand abhängt und die Aposteriori-Existenzwahrscheinlichkeit wiederum von den Datenassoziationen, kann das JIPDA-Filter als die in Abb. 20.4 dargestellte Verkopplung zweier Markov-Ketten interpretiert werden. Die obere Markov-Kette stellt die aus dem Kalman-Filter bekannte Zustandsprädiktion und Innovation dar, während die untere Markov-Kette die Prädiktion und Innovation der Existenzwahrscheinlichkeit repräsentiert. Für Details zum JIPDA-Verfahren und seine spezifische Formulierung hinsichtlich der Anwendungen im Automotive-Bereich sei beispielsweise auf [14] verwiesen. Aktuelle und erst in den letzten Jahren entwickelte Multi-Objekttracking-Verfahren erlauben ebenfalls eine integrierte objektspezifische Existenzschätzung. Für weitere Informationen hierzu sei auf [10], [17], [18] und [19] verwiesen.

Hinsichtlich des funktionalen Verhaltens der Existenzschätzung gelten dieselben Einschränkungen wie bei der Zustandsschätzung. Es wird fortlaufend ein probabilistisches Maß für die spezifische Existenz des Objekts geliefert. Sensorausfälle während des Betriebs können daher auch in dieser Unsicherheitsdomäne zuverlässig erkannt werden. Eine Vorausschau auf eine künftige Leistungsfähigkeit ist allerdings hier ebenfalls nicht möglich.

20.3.4 Klassenunsicherheit

Klassifikationsverfahren zur Bestimmung der Objektklasse, also das Bestimmen semantischer Informationen, sind sehr sensorspezifisch aufgebaut. Aufgrund des signifikant höheren Informationsgehaltes überwiegen im Bereich der Klassifikation bildbasierte Verfahren. Grundsätzlich unterscheidet man lernende Verfahren, bei denen der Klassifikator aufgrund von Positiv- und Negativbeispielen offline trainiert wird und der dann im Onlinebetrieb die trainierten Objektklassen mehr oder weniger gut erkennen kann. Die im Training verwendeten Merkmale werden entweder vorgegeben oder auch selbst im Lernprozess implizit generiert. Methodisch haben sich bei den lernenden Verfahren zwei grundsätzliche Vorgehensweisen etabliert. Zum einen sind dies kaskadierte Verfahren nach Viola und Jones [20] oder Methoden basierend auf verschiedenen Neuronalen Netzen [21], [22].

Eine eher klassische, aber ebenfalls noch übliche Vorgehensweise ist es, aus Sensordaten möglichst zahlreiche, für die unterschiedlichen Klassen diskriminierende deterministische Merkmale wie Länge, Breite oder Geschwindigkeit festzulegen und hierfür die klassenspezifischen statistischen Schwankungsbereiche zu ermitteln. Der Mittelwert der Einzelmerkmale wird inklusive Schwankungsbreite beispielsweise durch eine Normalverteilung approximiert. Anschließend erfolgt auf Basis der aktuellen Messwerte und der bekannten Merkmalverteilungen die Bestimmung der nach im Bayes'schen Sinne wahrscheinlichsten Klasse. Sollen unterschiedliche Sensoren kombiniert verwendet werden, die jeweils nur einzelne Merkmale des Gesamtsatzes erfassen können, bietet sich die Dempster-Shafer-Theorie [16] zur Klassenbestimmung an, da sie es erlaubt, auch „Nichtwissen“ zu berücksichtigen. Diese Verfahren sind in der Regel allerdings weniger leistungsfähig als lernende Verfahren, sodass sie vermutlich weiter an Bedeutung verlieren werden.

Nachteilig bei allen genannten Klassifikationsverfahren ist, dass keine theoretisch fundierten Wahrscheinlichkeiten für die augenblickliche Güte der Klassifikation bestimmt werden können. Hierzu existiert zurzeit keine umfassende theoretische Basis. Als Ausgabe der Klassifikatoren dient zurzeit lediglich ein individuelles Zuverlässigkeitsmaß, das auf den Wertebereich von null bis eins normiert werden kann. Eine Wahrscheinlichkeit im engeren Sinne stellt es nicht dar, sodass unterschiedliche Algorithmen diesbezüglich auch nicht vergleichbar sind. Bildbasierte trainierte Klassifikatoren unterscheiden sich so sehr von merkmalsbasierten Verfahren aus Lidar- oder Radarsensoren, dass deren einheitliche Behandlung nicht einfach möglich sein wird.

Tab. 20.1 Unsicherheitsdomänen der maschinellen Wahrnehmung und deren methodische Behandlung

	Zustandsunsicherheit	Existenzunsicherheit	Klassenunsicherheit
Ausprägung	Unsicherheit in den Zustandsgrößen wie Objektposition, Objektgeschwindigkeit etc.	Unsicherheit, ob ein von Sensorik erfasstes Objekt real existiert	Unsicherheit über Klassenzugehörigkeit (z. B. Pkw <-> Lkw)
Ursache	stochastische Messfehler der verwendeten Sensorik	Detektionsunsicherheiten einzelner Sensoren, beispielsweise Kamera oder Radar	Klassifikationsunsicherheiten der Algorithmen / Limitierungen einzelner Sensoren
Modellierung	probabilistisch, Erwartungswert mit Varianzen/Kovarianzen	probabilistisch über Detektionswahrscheinlichkeiten	keine durchgehende Methode, zurzeit vorwiegend heuristisch
Methoden	geschlossene Theorie über allgemeines Bayes-Filter (z. B. Variante Kalman-Filter)	geschlossene Theorie, gekoppelt an Schätzung Zustandsunsicherheit (z. B. JIPDA-Filter)	<i>merkmalbasiert:</i> Bayes, Dempster-Shafer, <i>lernbasiert:</i> Neuronale Netze, kaskadierte Verfahren (Viola und Jones etc.)
Prädiktion in die Zukunft	generell nein, bedingt möglich über Trendaussagen	generell nein	generell nein

20.3.5 Zusammenfassende Bewertung

Aus den Betrachtungen wird deutlich, dass die maschinelle Wahrnehmung drei wesentliche Unsicherheitsdomänen umfasst, nämlich die Zustandsunsicherheit, die Existenzunsicherheit und die Klassenunsicherheit. Alle Domänen haben direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung. Werden die Unsicherheiten zu hoch, wobei funktionspezifisch festzulegen ist, welche Unsicherheiten noch tolerabel sind, ist keine sichere Führung eines automatisierten Fahrzeugs mehr möglich.

Problematisch ist, dass eine zukünftig höhere Unsicherheit und damit eine größere Fehlerwahrscheinlichkeit nicht zeitlich vorhergesagt werden kann. Die heute bekannten Methoden zur Schätzung von Zustands- und Existenzunsicherheiten erlauben zwar eine aktuelle Einschätzung der Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung, eine Degeneration der Leistungsfähigkeit einzelner Sensoren oder gar ein Ausfall von Komponenten kann aber prinzipbedingt nicht vorhergesagt werden. Lediglich Trendaussagen sind möglich. Die folgende Tab. 20.1 fasst die Ergebnisse noch einmal zusammen.

20.4 Folgerungen für die maschinelle Wahrnehmungsleistungsprädiktion

Wie in den vorherigen Abschnitten ausgeführt und begründet, kann die zukünftige Entwicklung der maschinellen Wahrnehmungsleistung eines automatisierten Fahrzeugs aus grundlegenden Überlegungen heraus nicht mit ausreichender Konfidenz vorausgesagt werden. In keinem Fall kann die Wahrnehmungsleistung für den zur Übergabe der Fahraufgabe an den Menschen notwendigen Rückgabezeitraum von fünf bis zehn Sekunden unter allen Umständen sicher vorhergesagt werden, wie sie beim hochautomatisierten Fahren als Rückfalloption vorgesehen ist. Ein vollautomatisiertes Fahrzeug müsste autonom einen eigensicheren Zustand einnehmen können, wozu in einigen Fällen noch ein längerer Zeitraum erforderlich wäre als im Übernahmefall durch einen Fahrer. Obwohl es sicher einige Optionen der Prädiktion der zukünftigen Einschränkung der Wahrnehmungsleistungsfähigkeit aufgrund äußerer Bedingungen wie beispielsweise eine bevorstehende Kamerablendung durch eine tief stehende Sonne, Einschränkungen der Sensoren durch einsetzenden Regen, Schnee oder Nebelbänke gibt, sind dies spezielle Szenarien, die außerdem eine extrem robuste Kontextinformation benötigen. Somit ist eine Prädiktion der Wahrnehmungsleistungsfähigkeit prinzipbedingt keine generelle Option zur Gewährung der notwendigen Sicherheit beim automatisierten Fahren.

Wie oben ausgeführt, existieren jedoch bereits theoretisch fundierte Methoden und Verfahren, um die aktuelle maschinelle Wahrnehmungsleistung kontinuierlich zu überwachen und Systemausfälle sowie Degradationen einzelner Komponenten zeitnah und sicher erkennen zu können. Konzeptionell müssten daher maschinelle Wahrnehmungssysteme so ausgelegt werden, dass eine sensorische Redundanz vorhanden ist, die eine ausreichende Restfunktion der Wahrnehmungsleistung entweder bis zur Übergabe an den Fahrer oder im Fall des vollautomatisierten Fahrzeugs bis zum Erreichen eines eigensicheren Zustands bei Ausfall einzelner Komponenten gewährleistet. Ein komplettes Versagen der maschinellen Wahrnehmung darf daher nicht auftreten.

Derartige Redundanzen bieten grundsätzlich Multisensorsysteme, die Informationen verschiedener Sensoren und Sensorprinzipien parallel nutzen und fusionieren. Sind beispielsweise Radar- und Lidarsensoren verbaut, so liefern beide Entfernungsmessdaten, allerdings in unterschiedlicher Qualität und in einem unterschiedlichen Sensorerfassungsbereich. Auch die Witterungsabhängigkeiten der Sensorprinzipien sind unterschiedlich. Aufgrund der Ähnlichkeit der Messdaten können sie sich jedoch gegenseitig stützen bzw. bei geringer Einbuße der Messqualität des Gesamtsystems auch gegenseitig bei Ausfall einer Komponente kompensieren. Erst durch diese Nutzung unabhängiger Sensorprinzipien wird es zudem möglich sein, die im Rahmen der funktionalen Sicherheit für das automatisierte Fahren notwendige höchste Sicherheitsstufe gemäß des Automotive Safety Integrity Level (ASIL D) zu erreichen.

Bei Kameras kann ebenfalls leicht eine Redundanz vorgesehen bzw. hergestellt werden. Fällt beispielsweise eine Kamera eines Stereokamerasystems aus, so steht für Klassifikationsaufgaben und die Erkennung von Straßenmarkierungen noch die zweite Kamera des

Stereosystems zur Verfügung. Lediglich eine Entfernungsschätzung ist dann aus Stereodaten nicht mehr verfügbar und müsste beispielsweise durch Lidar- oder Radarsensoren kompensiert werden. Voraussetzung für diese Redundanz ist natürlich, dass die Verarbeitungshardware und grundlegende Software der Einzelkameras unabhängig, d. h. redundant ausgelegt sind. Alternativ könnte natürlich auch eine weitere Monokamera inklusive eigener Verarbeitungshardware und -software verbaut werden. Durch derartige Redundanzkonzepte kann somit auch bei Ausfall einzelner Komponenten immer eine Mindestwahrnehmungsleistung des automatisierten Fahrzeugs aufrechterhalten werden.

Die automatisierte Fahrzeugführung auf Bahnebene basiert auf der aktuellen maschinellen Wahrnehmung bzw. der darauf aufbauenden Prädiktion der aktuellen Verkehrssituation. Letztere erfolgt nach dem Stand der Technik im Wesentlichen durch eine einfache Prädiktion des aktuellen Bewegungsverhaltens der Objekte in die Zukunft. Aufgrund der Vielzahl der möglichen und nicht voraussehbaren Ereignisse, insbesondere reaktiver Aktionen anderer Verkehrsteilnehmer, steigen die Unsicherheiten der Situationsprädiktion nach etwa zwei bis drei Sekunden so stark an, dass hierauf keine verlässliche Trajektorienplanung mehr möglich ist. Die Situationsprädiktion kann daher auch nicht den Rückgabezeitraum zum Fahrer beim hochautomatisierten Fahren oder das Erreichen eines eigensicheren Zustands beim vollautomatisierten Fahren sicher überbrücken, falls die maschinelle Wahrnehmung das Fahrzeugumfeldmodell nicht mehr ständig aktualisiert.

Der Mensch ist aufgrund seiner Fahrerfahrung allerdings auch in der Lage, die Gesamtsituation für etwa zwei bis drei Sekunden in die Zukunft mit gewisser Sicherheit vorherzusagen [23]. Da der Mensch seine Umgebung aber quasikontinuierlich wahrnimmt und interpretiert, reicht dieser kurze Vorhersagehorizont völlig aus, adäquat und deeskalierend in nahezu allen Situationen zu reagieren und Unfälle in aller Regel zu vermeiden. Dies sollte also auch für automatisierte Fahrzeuge möglich sein, wobei hier natürlich zusätzlich Latenzen sowie Unsicherheiten in der Wahrnehmung zu berücksichtigen sind. Voraussetzung ist, wie oben erwähnt, eine garantierte Mindestleistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung.

Wesentlich für die Gesamtfunktion ist es allerdings, dass sich das automatisierte Fahrzeug erst gar nicht in eine technisch unlösbare Situation bringt. Die zulässige Kritikalität der Situation muss dabei immer der aktuellen maschinellen Wahrnehmungsleistung entsprechen. Es sind hierbei insbesondere auch plötzlich auftretende Ausfälle und damit eine spontane Reduktion der maschinellen Wahrnehmungsleistung zu berücksichtigen. Innerhalb der einigermaßen verlässlichen Prädiktionszeit für die Situationsentwicklung von zwei bis drei Sekunden muss das automatisierte Fahrzeug dann in der Lage sein, sein Fahrverhalten der geänderten maschinellen Wahrnehmungsleistung anzupassen. Ein einfaches Beispiel wäre das Fahren auf einem Fahrstreifen. Verringert sich durch technische Ausfälle oder Witterungseinflüsse die Sensorreichweite, muss das Fahrzeug in der Lage sein, seine Geschwindigkeit innerhalb der Gültigkeit der Prädiktion der aktuellen Situation anzupassen, was ein sicher lösbares technisches Problem darstellt.

Während diese einfache Situation leicht beschreibbar und untersuchbar ist, ist allgemein heute nicht bekannt, wie es zu kritischen Situationen kommt und was im Hinblick auf die

technische Leistungsfähigkeit eines automatisierten Fahrzeugs überhaupt als kritisch zu bewerten ist. Für die Absicherung automatisierter Fahrzeuge gewährleistet das Abfahren eines vordefinierten Kilometerumfangs in jedem Fall nicht, dass der dadurch entstehende Datensatz alle möglichen kritischen Situationsentwicklungen (Episoden) enthält. Folglich ist eine Absicherung der Funktionssicherheit auf diese Art und Weise nicht möglich, unabhängig davon, dass die zum statistischen Nachweis der sehr geringen Fehlerraten notwendigen Kilometerleistungen weder praktisch noch wirtschaftlich realisierbar wären.

Eine mögliche zukünftige Forschungsaufgabe wäre daher die Suche nach einer geeigneten mathematischen Repräsentation beliebiger Episoden, die dann den Raum aller möglichen Episoden aufspannen. Aufbauend auf dieser Beschreibung kann dann beispielsweise durch sogenannte Monte-Carlo-Simulationen der gesamte Episodenraum in kritische und unkritische Teilbereiche strukturiert werden, um hieraus eine Aussage zu notwendigen spezifischen Tests ableiten zu können. Ein möglicher methodischer Ansatz hierzu ist das Rejektion-Sampling, wobei jedes Sample eine vollständige Episode repräsentiert. Ausgehend von Grundepisoden, die sich beispielsweise durch unterschiedliche Fahrbahntypen (ein, zwei oder drei Fahrstreifen pro Richtung, Gegenverkehr) oder die Anzahl der Fahrzeuge im Nahbereich unterscheiden, werden durch statistische Variation der Episodenparameter ähnliche Situationen generiert. Bei einer hinreichenden Anzahl an Samples besteht die Erwartung, den Episodenraum vollständig abzudecken. Jede gezogene Episode wird dabei auf ihre physikalische Realisierbarkeit überprüft und irrelevante Episoden verworfen. Die verbleibenden Episoden werden anschließend dahingehend überprüft, ob sich beispielsweise kritische Zeitlücken oder Abstände zwischen Objekten ergeben. Die Kriterien hierfür sind ebenfalls geeignet festzulegen. Die Identifikation und Priorisierung kritischer Situationen erfolgt durch ein folgendes Clustern im Episodenraum.

Ziel eines solchen Vorgehens wäre es, durch die hierarchische Vorgehensweise eine möglichst vollständige, aber dennoch handhabbare Menge potenziell kritischer Episoden zu bestimmen. Diese werden im Anschluss anhand simulierter Daten hinsichtlich der Beherrschbarkeit durch das hochautomatisierte System bei verschiedenen Stufen der maschinellen Wahrnehmungsleistung untersucht. Beispielsweise könnten für ein Sensor-Setup im Fahrzeug individuelle Reichweiten, Erfassungswinkel und Detektionsraten modelliert werden, um dann systematisch die Konsequenzen für das Verhalten des Fahrzeugs in kritischen Episoden zu untersuchen. Diese Untersuchung kann zunächst für ein voll funktionsfähiges System und im Anschluss unter der Annahme eines Ausfalls von Einzelkomponenten durchgeführt werden.

Eine weitere offene Forschungsfrage ist die nach einer zuverlässigeren Situationsprädiktion, die unter Nutzung von Kontextinformationen und Hypothesen über das zukünftige Verhalten der Verkehrsteilnehmer prinzipiell längere Prädiktionszeiträume ermöglicht. Eine derartige Vorgehensweise wäre insofern gerechtfertigt, als dass unser gesamter Verkehr auf der Kooperation der Verkehrsteilnehmer beruht. Nachteilig hieran wäre natürlich, dass ein unkooperatives Verhalten oder auch schlicht Fehler anderer Verkehrsteilnehmer dann natürlich nicht erwartet und in die Handlungsplanung eines automatisierten Fahrzeugs mit einbezogen werden können. Insofern erlauben solche Ansätze keine weitreichende

Erweiterung des sicher prädizierbaren Zeitraums, können aber Planungsalgorithmen dennoch unterstützen. Ferner ist anzumerken, dass manuelle Fahrer auch in vielen Situationen keine Chance haben, geeignet zu reagieren, wenn sich andere Fahrzeugführer nicht regelgerecht verhalten oder unvorhergesehene Fahrfehler begehen. Insofern müssen auch an automatisierte Fahrzeuge sicher keine zu übertriebenen Anforderungen gestellt werden. Dies ist aber natürlich eine Frage des gesellschaftlichen Konsenses hinsichtlich des zulässigen Gefährdungspotenzials einer neuen Technologie.

20.5 Zusammenfassung

Die existierenden Methoden der Zustands- und Existenzschätzung basieren auf einer geschlossenen, fundierten Theorie und erlauben schritthaltend eine zuverlässige Bewertung der aktuellen Güte der maschinellen Wahrnehmungsleistung. Hiermit ist es möglich, Komplettausfälle einzelner Sensoren sowie eine schleichende Degeneration in der Sensorik und/oder Wahrnehmung festzustellen.

Die Verfahren erlauben jedoch keine Vorhersage der zukünftigen Wahrnehmungsleistung, lediglich ein lineares Fortschreiben von erkannten Trends ist denkbar. Die Zuverlässigkeit und Güte der Bewertung der maschinellen Wahrnehmungsleistung ist von verfügbaren Sensormodellen abhängig, insbesondere von Fehlermodellen, die sensor- und herstellerspezifisch sind. Die Wahrnehmungssysteme allein besitzen keine ausreichende Prädiktionsfähigkeit, die einen Zeithorizont zwischen fünf und zehn Sekunden sicher abdecken könnte, so wie er heute für den Rückgabefall des hochautomatisierten Systems an den Fahrer angesehen wird. Dies ist allerdings für ein sicheres Verhalten eines automatisierten Fahrzeugs vermutlich auch gar nicht notwendig. Entscheidend für die Beherrschbarkeit von Situationen beim automatisierten Fahren sind ausreichend viele, physikalisch umsetzbare und sichere Handlungsoptionen des automatisierten Fahrzeugs. Diese sind im Wesentlichen durch die räumliche Nähe von begrenzenden Objekten zum eigenen Fahrzeug und den verfügbaren, befahrbaren Freiraum bestimmt, sodass räumliche Nähe unter Einbeziehung von Unsicherheiten in der Wahrnehmung und die Zahl der physikalisch möglichen, sicheren Handlungsoptionen in Kennzahlen zur Bewertung einer Kritikalität einfließen müssen. Auch muss die aktuell verfügbare maschinelle Wahrnehmungsleistung hierin Berücksichtigung finden. Derartige ausreichend abgestimmte und theoretisch fundierte Kritikalitätsmaße existieren heute noch nicht.

Eine Situationsprädiktion in die Zukunft über einen Zeitraum von zwei bis drei Sekunden hinaus wird bei rein modellbasierter, probabilistischer Fortschreibung keine Aussage mehr liefern, da jede Entwicklung der Situation möglich ist. Ein möglicher Lösungsansatz und eine zukünftige Forschungsfrage ist die kontextbezogene, hypothesenbasierte zeitliche Fortschreibung einer erkannten und bewerteten Situation. Eine Möglichkeit ist hier, in Anlehnung an das menschliche Verhalten, Situationsepisoden, d. h. reale Entwicklungen aus einem beliebigen Anfangsstand im Fahrbetrieb, zu erfassen, zu clustern und in einer Wissensbasis zu hinterlegen. Bei vorhandener Wissensbasis kann dann ständig die aktuel-

le Situation in Bezug auf den vermeintlichen Ausgang der Entwicklung bewertet werden. Hierfür existieren zurzeit keine gesicherten Methoden, teilweise nicht einmal Ideen zur Realisierung. Es scheint jedoch ein Weg zu sein, der begangen werden kann.

Die Fortschritte zur Situationsprädiktion lassen sich extrem schwer voraussagen. Signifikant leistungsfähigere Verfahren sind aber vermutlich nur in einem Zeithorizont von zehn Jahren und mehr zu erwarten.

Literatur

1. Damböck, D.; Bengler, K.; Farid, M.; Tönert, L.: Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. Tagungsband der VDI-Tagung Fahrerassistenz in München, Jahrgang 15, Seite 16ff, 2012
2. Gold, C.; Damböck, D.; Lorenz, L.; Bengler, K.: "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop? In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Vol. 57, No. 1, pp. 1938–1942, 2013
3. Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Eds.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Auflage (2012), Teubner Verlag
4. Nuss, D.; Reuter, S.; Konrad, M.; Munz, M.; Dietmayer, K.: Using grid maps to reduce the number of false positive measurements in advanced driver assistance systems. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012, pp.1509–1514
5. Bouzouraa, M.; Hofmann, U.: Fusion of occupancy grid mapping and model based object tracking for driver assistance systems using laser and radar sensors. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010, pp. 294–300
6. Coué, C.; Pradalier, C.; Laugier, C.; Fraichard, T.; Bessiere, P.: Bayesian Occupancy Filtering for Multitarget Tracking: an Automotive Application. International Journal of Robotics Research, 2006, Vol. 25.1, pp.19–30
7. Konrad, M.; Szczot, M.; Schüle, F.; Dietmayer, K.: Generic grid mapping for road course estimation. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011, pp. 851–856
8. Schmid, M.R.; Mählich, M.; Dickmann, J.; Wünsche, H.-J.: Dynamic level of detail 3d occupancy grids for automotive use. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010, pp. 269–274
9. Kalman, R.: A new approach to linear filtering and prediction problems. Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, 1960, Vol. 82, pp. 35–45
10. Mahler, R.: Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion. Artech House, Boston, 2007
11. Bar-Shalom, Y.; Tse, E.: Tracking in a cluttered environment with probabilistic data association. Automatica, 1975, Vol. 11, pp. 451–460
12. Bar-Shalom, Y.; Fortmann, T.: Tracking and Data Association. Academic Press, Boston, 1988
13. Musicki, D.; Evans, R.: Joint Integrated Probabilistic Data Association: JIPDA, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2004, Vol. 40.3, pp. 1093–1099
14. Munz, M.: Generisches Sensorfusionsframework zur gleichzeitigen Zustands- und Existenzschätzung für die Fahrzeugumfelderfassung. PhD Thesis, Ulm University, 2011
15. Nuss, D.; Stuebler, M.; Dietmayer, K.: Consistent Environmental Modeling by Use of Occupancy Grid Maps, Digital Road Maps, and Multi-Object Tracking. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2014
16. Shafer, G.: A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press, 1976
17. Reuter, S.; Wilking, B.; Wiest, J.; Munz, M.; Dietmayer, K.: Real-time multi-object tracking using random finite sets. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, Vol. 49.4, pp. 2666–2678

18. Vo, B.-T.; Vo, B.-N.: Labeled Random Finite Sets and Multi-Object Conjugate Priors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, Vol. 61, 3460–3475
19. Reuter, S.; Vo, B. T.; Vo, B. N.; Dietmayer, K.: The labeled multi-Bernoulli filter. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 62(12), pp. 3246–3260, 2014
20. Viola, P.; Jones, M.: Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on* (Vol. 1, pp. I–511). IEEE
21. Egmont-Petersen, M.; de Ridder, D.; Handels, H.: Image processing with neural networks – a review. *Pattern recognition*, 35(10), pp. 2279–2301
22. Zhang, G. P. : Neural networks for classification: a survey. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 30(4), pp. 451–462
23. Godthelp, H.; Milgram, P.; Blaauw, G. J.: The development of a time-related measure to describe driving strategy. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 26(3), 1984, pp.257–268

Walther Wachenfeld, Hermann Winner

Inhaltsverzeichnis

21.1 Einleitung 440

21.2 Aktuelle Testkonzepte in der Automobilindustrie 443

21.3 Anforderungen an ein Testkonzept 447

 21.3.1 Effektivitätskriterien 447

 21.3.2 Effizienzkriterien 448

21.4 Besonderheiten des autonomen Fahrens 449

 21.4.1 Vergleich zwischen aktueller Automatisierung
 und Vollautomatisierung der Straßenfahrzeuge 449

 21.4.2 Vergleich der Bedingungen in der Luftfahrt,
 im Straßenverkehr und im Eisenbahnverkehr 451

21.5 Freigabeherausforderung für das vollautomatisierte Fahren (Freigabefälle) 451

 21.5.1 Aussagekraft des aktuellen Testkonzepts für das autonome Fahren 453

 21.5.2 Millionen Kilometer auf öffentlichen Straßen bis zur Freigabe
 des vollautomatischen Fahrens 454

21.6 Ansätze für das Lösen der Freigabeherausforderung 458

 21.6.1 Wiederverwenden freigegebener Funktionen 458

 21.6.2 Beschleunigung der Freigabe 459

21.7 Fazit 462

Literatur 463

W. Wachenfeld (✉)
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
wachenfeld@fzd.tu-darmstadt.de

H. Winner
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
winner@fzd.tu-darmstadt.de

21.1 Einleitung

Die Funktionen des autonomen Fahrens könnten in Zukunft den gesamten Straßenverkehr grundlegend verändern; dafür müssen diese in einer großen Stückzahl und somit als Serienprodukte zum Einsatz kommen. Im Allgemeinen ist für den Übergang eines technischen Systems von der Entwicklungsphase in die Serienproduktion die Freigabe dieses Systems notwendig [1]. Nach den Grundsätzen des Projektmanagements erfolgt die Freigabe erst dann, wenn die zuvor definierten Anforderungen von diesem technischen System erfüllt werden. Diese Anforderungen haben unterschiedlichste Ursprünge, wie beispielsweise Kunden, Normen oder Gesetze. Verschiedene Bereiche werden durch die Anforderungen adressiert: Darunter fallen nicht zuletzt aus Gründen der Typgenehmigung¹ als auch der Produkthaftung² Anforderungen an die Sicherheit des technischen Systems.

Die Sicherheit des Menschen im öffentlichen Straßenverkehr ist eine der viel zitierten Motivationen für die Fahrzeugautomatisierung, denn die weit überwiegende Zahl der aktuellen Unfälle wird durch den menschlichen Fahrer verursacht. Aus dieser Motivation folgt die Anforderung, dass die Substitution des Menschen die Sicherheit im öffentlichen Straßenverkehr nicht mindert. Dies soll sowohl für den Insassen als auch für das gesamte Verkehrssystem gültig sein, in dem sich das autonome Fahrzeug bewegt. Was diese Anforderung bedeutet und ob sie tatsächlich bei Einführung gestellt wird, steht im Fokus der folgenden Diskussion.

Überlegungen von Gasser et al. [4] liefern hierzu einen Einstieg: Der Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen betrachtet die Entwicklung der Unfallzahlen mit Einführung der Fahrzeugautomatisierung. Ausgehend von der Gesamtzahl der Unfälle bei konventioneller Fahrzeugführung (s. Abb. 21.1 blaues und grünes Feld) wird angenommen, dass Unfälle (grünes Feld) durch die Fahrzeugautomatisierung vermieden werden. Zusätzlich könnten jedoch neue Unfälle aufgrund von Automatisierungsrisiken entstehen (gelbes Feld).

Bei dieser Darstellung wird nicht nach der Schwere des Unfalls unterschieden; jedoch ist die Schwere eines Unfalls bei Betrachtung der Auswirkungen auf die Sicherheit ebenfalls von Relevanz. Sicherheit wird allgemein als Abwesenheit von unangemessenen Risiken beschrieben. Dieses Risiko ist definiert als Produkt aus Wahrscheinlichkeit für einen Unfall und Schadensschwere infolge des Unfalls.

Abb. 21.2 illustriert dieses theoretische Risikovermeidungspotenzial abhängig von der Schwere eines Unfalls in qualitativer Weise. Sie folgt dabei den Erkenntnissen von

1 Im Sinne der Richtlinie 2007/46/EG [2] bezeichnet der Ausdruck „... ,Typgenehmigung‘ das Verfahren, nach dem ein Mitgliedstaat bescheinigt, dass ein Typ eines Fahrzeugs (...) den einschlägigen Verwaltungsvorschriften und technischen Anforderungen entspricht“.

2 Reuter schreibt: „Die (deliktische) Produkthaftung dient dem Schutz von jedermann (Produktnutzer sowie unbeteiligte Dritte) vor unsicheren Produkten. Die Produkthaftung regelt den Ersatz von Folgeschäden, die als Folge der Verletzung von Gesundheit oder Eigentum durch Produktfehler verursacht wurden.“ [3]

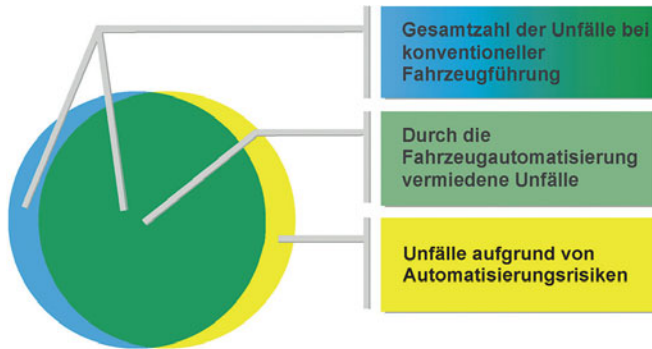


Abb. 21.1 Theoretisches Unfallvermeidungspotenzial bei Fahrzeugautomatisierung [4]

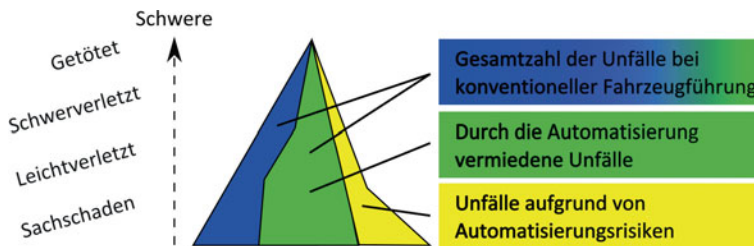


Abb. 21.2 Theoretisches Unfallvermeidungspotenzial bei Fahrzeugautomatisierung unter Berücksichtigung der Unfallschwere (nach [4])

Heinrich [5] und Hydén [6], dass Unfälle mit abnehmender Schwere in größerer Zahl auftreten. Die Skala der zugehörigen Schwere des Unfalls ist ordinal, d. h., eine Ordnung zwischen den verschiedenen Schweregraden ist eindeutig vorhanden: Ein Getöteter wiegt beispielsweise schwerer als ein Schwerverletzter. Das Verhältnis zwischen den Stufen ist jedoch in der Wissenschaft strittig. Zwar werden Schweregrade über Kosten verglichen, dies ist jedoch umstritten und wird in dieser Arbeit nicht weiter diskutiert.

Aus der Betrachtung von Schwere und Anzahl folgt, dass zwar Risiken behoben werden (s. Abb. 21.2 grüner Bereich), aber auch weiterhin Risiken existieren (s. Abb. 21.2 blauer Bereich), die nicht durch die Fahrzeugautomatisierung adressiert werden. Zusätzlich entstehen neue Risiken durch die Substitution des Menschen und die automatisierte Ausführung der Fahrzeugführung. Der Mensch steht nicht mehr als Rückfallebene im Fall eines Fehlers oder einer Unzulänglichkeit zur Verfügung. Abb. 21.2 stellt dieses zusätzliche Risiko durch den gelben Bereich dar. Hierbei ist ungewiss, ob das Beheben von Risiken und das Entstehen zusätzlicher Risiken über die Schwere gleichmäßig erfolgt. Möglich ist eine stärkere Abnahme von schweren Unfällen, aber eine Zunahme von leichteren Unfällen. Abb. 21.2 zeigt diesen Gedanken mithilfe der Verformung des angenommenen Dreiecks.

Für die Freigabe des vollautomatisierten Fahrens bedeutet dies, dass nicht nur eine Reduktion der Unfallzahlen nachzuweisen ist, sondern ein akzeptiertes Verhältnis V_{akz} zwischen vermiedenen R_{ver} und zusätzlich hervorgerufenen Risiken R_{zus} .

$$V_{akz} = \frac{R_{zus}}{R_{ver}}$$

Entgegen vieler Aussagen ist bisher noch nicht nachgewiesen, dass ein Verhältnis kleiner eins tatsächlich für die Freigabe notwendig ist. Werden autonome Fahrzeuge tatsächlich die Verkehrssicherheit erhöhen? Wäre das Verhältnis größer eins, würde durch das System die Verkehrssicherheit reduziert. Heute existieren Beispiele, bei denen ein entsprechender Zusatznutzen Akzeptanz für zusätzliche Risiken schafft: Das Erleben von Freiheit, Fahrspaß usw. wiegt beispielsweise für viele Motorradfahrer das erhebliche Zusatzrisiko gegenüber anderen Fortbewegungsmitteln auf, wobei der Akzeptanz des Motorradfahrens die Verteilung von Nutzen und Risiko zugutekommt. Der Zusatznutzen sowie das Zusatzrisiko betreffen überwiegend die Person auf einem Motorrad. Das von einem Motorrad ausgehende Risiko für andere Verkehrsteilnehmer liegt zwischen den Risiken, die von Fahrrad und Pkw ausgehen, sodass Motorradfahren auch ohne Zusatznutzen für andere Verkehrsteilnehmer akzeptabel ist.

In diesem Beitrag wird *kein* konkreter Wert des akzeptablen Verhältnisses für autonomes Fahren ermittelt, denn dieser Wert ist das Ergebnis einer vielschichtigen Diskussion der Beteiligten, die vom autonomen Fahren betroffen wären. Dieser Wert variiert, bedingt durch unterschiedliche Faktoren wie etwa gesellschaftliche, politische und ökonomische Unterschiede. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist die Akzeptanz des Einsatzes von Atomenergie in Deutschland, den USA oder Japan über die letzten Jahre hinweg: Zum einen unterscheidet sich das akzeptierte Verhältnis zwischen den Ländern grundlegend und zum anderen verändert es sich über die Zeit, sodass beispielsweise in Deutschland 2012 der Ausstieg aus der Atomenergie beschlossen wurde.

Das Zentrum dieses Beitrags bildet die Bewertung des autonomen Fahrens, also die Frage nach Methoden, die eine Freigabe ermöglichen sollen. Auch wenn eine Vielzahl von Arbeiten die Potenziale des autonomen Fahrens theoretisch beschreiben, ist den Autoren keine Untersuchung bekannt, die diese Bewertung erbracht hat. Um zu zeigen, warum dies so ist, werden zunächst die aktuellen Freigabekonzepte in der Automobilindustrie beschrieben und anschließend dargestellt, welche Anforderungen an Testkonzepte bestehen. Im dritten Abschnitt werden die Besonderheiten des autonomen Fahrens im Verhältnis zu aktuellen Systemen beschrieben. Basierend darauf wird im vierten Abschnitt die besondere Herausforderung für eine Freigabe des autonomen Fahrens hergeleitet. Die Ansätze, die diese Herausforderung adressieren, werden diskutiert, um im letzten Abschnitt ein Fazit zur Freigabe von autonomen Fahrzeugen zu ziehen.

21.2 Aktuelle Testkonzepte in der Automobilindustrie

Freigabekonzepte, die aktuell in der Automobilindustrie eingesetzt werden, erzielen Freigaben für vier verschiedene Automatisierungsstufen. Um den Unterschied für die Freigabe dieser Systeme im Vergleich zum autonomen Fahren herzuleiten, werden diese vier Systeme kurz erläutert:

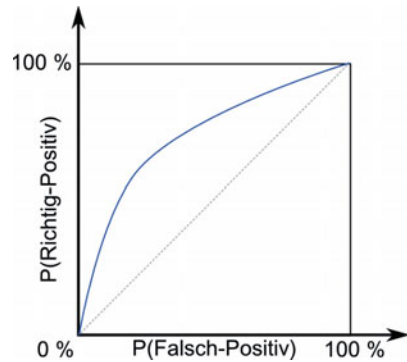
Das erste System in Serie ist das Driver-Only-Fahrzeug ohne Automatisierung der Fahraufgabe. Bei diesen Systemen wird auf der einen Seite gezeigt, dass eingesetzte Komponenten maximale Ausfallwahrscheinlichkeiten (*Failure Rate*) nicht überschreiten und auf der anderen Seite der Fahrer in der Lage ist, das Fahrzeug sicher im Straßenverkehr zu bewegen (*Controllability*). Dabei wird auf die Fähigkeiten des Fahrzeugführers vertraut, denn die Ergebnisse von ausgeführten Tests mit Testfahrern werden auf zukünftige Nutzer im späteren Einsatzbereich übertragen. Dies hat sich während der letzten Jahrzehnte als erfolgreich erwiesen, um Sicherheit nachzuweisen. Trotz steigender Fahrtkilometer im Straßenverkehr bleibt die Anzahl an Unfällen konstant bzw. ist die Zahl tödlich Verunglückter sogar rückläufig.

Die zweite Stufe der in Serie vorhandenen Automatisierung ist das assistierende System: Für Systeme wie Adaptive Cruise Control (ACC) oder Lane Keeping Assist (LKA) ist zusätzlich zum bestehenden Umfang die Funktion dieser Systeme entsprechend dem ADAS Code of Practice [7] abzusichern. Dabei ist für Systeme, die die primäre Fahraufgabe aktiv unterstützen, den Komfort erhöhen und die Belastung reduzieren, vor allem die Kontrollierbarkeit und die Möglichkeit zur Übernahme zu gewährleisten. Der Code of Practice [7] geht bei diesen ADAS davon aus, dass der Fahrer die Verantwortung für das Verhalten des Fahrzeugs behält. Für diese Systeme gilt erneut, dass auf die Fähigkeiten des Fahrzeugführers vertraut wird, sodass die Ergebnisse von ausgeführten Tests mit Testfahrern auf den späteren Einsatzbereich mit zukünftigen Nutzern übertragen werden.

Ebenfalls freigegeben für den Einsatz in Serienfahrzeugen wurden erste teilautomatisierte Systeme: ACC in Verbindung mit LKA übernimmt abhängig von der Geschwindigkeit Quer- und Längsführung für den Fahrer. Gemäß Definition obliegt die Verantwortung des Fahrzeugverhaltens auch für die dritte Kategorie von Systemen dem Fahrer. Dementsprechend stehen auch für diese Freigabe die Möglichkeit zur Übernahme und die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer im Fokus; somit gilt der gleiche Grundsatz wie für das assistierende System, der auf die Fähigkeiten des Fahrzeugführers zur Korrektur von ungewünschtem Automatisierungsverhalten vertraut. Diese Stufe der Automatisierung besitzt die besondere Herausforderung für die Freigabe, die aus dem Konflikt zwischen Entlastung des Fahrers und notwendigem Situationsbewusstsein des Überwachers von Quer- sowie Längsführung folgt. Jedoch liegt auch hierbei letztlich die Verantwortung beim Fahrer.

Von besonderem Interesse für die Freigabe sind Notreaktionssysteme, die automatisiert in die Fahrzeugregelung und somit in die Fahrdynamik eingreifen. Ziel dieser vierten Kategorie von Systemen ist es, dem Kontrollverlust des Fahrers über die Situation entgegenzuwirken. Beispielsweise sind Electronic Stability Control (ESC) und Emergency Brake Assist (EBA) Teile mechatronischer Bremssysteme und bauen ohne Aktion des

Abb. 21.3 Prinzipdarstellung einer Receiver-Operating-Characteristic-Kurve (nach [8])



Fahrers zusätzliche Bremskraft auf bzw. ab und greifen somit aktiv in die Fahrdynamik ein. Dies geschieht während des Kontrollverlusts durch den Fahrer, wenn das Fahrzeug in Verbindung mit dem Fahrer einem erhöhten Risiko ausgesetzt ist. ESC wird so ausgelegt, dass eingegriffen wird, wenn das Fahrzeug vom Fahrer in der aktuellen Situation offensichtlich nicht mehr beherrscht wird (z. B. bei sehr starkem Über- oder Untersteuern). Der EBA wird hingegen dann aktiv, wenn Reaktionszeit und Bremsweg bis zu einem Auffahrunfall für den Menschen nicht mehr ausreichen, diesen Unfall zu verhindern. Ziel für die Absicherung ist es zu zeigen, dass Notreaktionssysteme möglichst nur dann aktiv werden (Richtig-Positiv-Rate), wenn der Kontrollverlust offensichtlich wird und somit ein stark erhöhtes Risiko herrscht. Dafür ist zu zeigen, dass die Falsch-Positiv-Rate möglichst klein wird und/oder die Auswirkungen vom Fahrer kontrolliert werden können; Falsch-Positiv- und Falsch-Negativ-Raten der EBA hängen vor allem von der Objekterkennung ab. In Abb. 21.3 ist eine Receiver-Operating-Characteristic-Kurve (ROC-Kurve) dargestellt, die diesen Zusammenhang für die Objekterkennung beschreibt.

Da es sich bei diesen Notreaktionssystemen um Systeme ohne Funktionsversprechen handelt, kann eine Erhöhung der Sicherheit durch Reduktion des Nutzens und eine kleinere Falsch-Positiv-Rate erzielt werden. Zusätzlich ermöglichen diese Systeme auch ein Übersteuern. ESC und EBA greifen über das gezielte Abbremsen von Rädern nur in ein Stellsystem ein und können mit unterschiedlichen Strategien durch Lenken und/oder Beschleunigen übersteuert werden.

Wie gezeigt wurde, steht bei der Entwicklung der vier Systemstufen die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer im Mittelpunkt: Entweder geht es darum, dem Fahrer die Kontrollierbarkeit zu ermöglichen oder sie für ihn wiederherzustellen (*Design for Controllability*). Der Fahrer als Rückfallebene ist somit Grundlage für die Absicherung aktueller Fahrzeuge.

Die Entwicklung und der Nachweis dieser Kontrollierbarkeit für den Fahrer erfolgt meist entsprechend dem Vorgehensmodell in Abb. 21.4. Dieses Vorgehen nach dem V-Modell unterscheidet zwischen dem linken absteigenden Ast der Entwicklung und Auslegung und dem rechten aufsteigenden Ast der Verifikation und Validierung als Mittel zur Qualitätssicherung. Für die Qualitätssicherung wird dabei einem Testkonzept gefolgt.

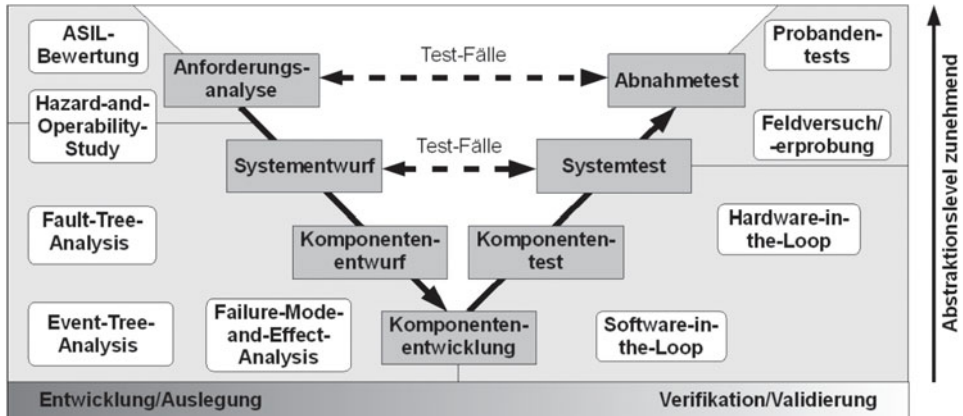


Abb. 21.4 Einordnung von Sicherheitsbewertungsmethoden im Entwicklungsprozess (nach [9])

Ein Testkonzept umfasst, wie von Schuldt et al. [10] in Abb. 21.5 dargestellt, die Analyse des Testobjekts (object under test – OUT), die Testfallgenerierung, die Testdurchführung sowie die Testauswertung.

Dabei sollten die Analyse des Testobjekts sowie die Testfallgenerierung bereits während der Entwicklungs-/Auslegungsphase stattfinden, sodass für die Verifikation und Validierung die durchzuführenden Testfälle bereits definiert sind (s. Abb. 21.4 V-Modell). Nach Horstmann [11] und Weitzel [9] wird aktuell für die Ermittlung von Testfällen zwischen drei Methoden unterschieden: Eine Methode ist die lastenheftbasierte Testspezifikation, bei welcher Testfälle basierend auf Systemspezifikationen definiert werden, die beispielsweise in Lastenheften festgehalten wurden. Die zweite Methode stellt die risikobasierte Testspezifikation dar, bei der Risikobetrachtungen für die Testfallermittlung eingesetzt werden. Als dritte Methode wird die schnittstellenbasierte Testspezifikation unterschieden, bei der die Testfälle so gewählt werden, dass sie die Wertebereiche der Schnittstellen entsprechend abdecken. Für alle Methoden ist das System Fahrer – Fahrzeug die Grundlage der Testfallermittlung.

Abb. 21.5 Vorgehensweise des Testkonzepts (nach [10])



Um mit der Qualitätssicherung möglichst frühzeitig zu beginnen, werden bereits, bevor die ersten Testfahrzeuge erprobungstauglich sind, Tests in virtuellen Testumgebungen durchgeführt. Die Testdurchführung mittels Modell- und Software-in-the-Loop prüft Funktionen basierend auf Simulationsmodellen des Fahrzeugs, des Menschen sowie des Umfelds. Dabei werden die zuvor identifizierten Testfälle eingesetzt. Je weiter die Entwicklung voranschreitet, desto mehr reale Komponenten stehen zur Verfügung, die einem Test unterzogen werden: Hierbei kommen Prüfstände, Fahrsimulatoren oder Testgelände zum Einsatz. Die Testdurchführung mittels Hardware-in-the-Loop, Driver-in-the-Loop oder Vehicle-in-the-Loop geben Auskunft über die Qualität der unter Test stehenden Komponenten und Funktionen. Um Aktion und Reaktion des Systems Fahrer – Fahrzeug – Umwelt zu überprüfen (den Loop zu schließen), werden auch für diese Testdurchführungen Simulationsmodelle eingesetzt. Daher werden bis zu diesem Entwicklungszeitpunkt für die Testdurchführung stets Simulationsmodelle benötigt, um das Gesamtfahrzeug zu testen. Simulationsmodelle sind Abbildungen der Realität in Software und haben per se die Eigenschaft, die Komplexität der realen Welt zu vereinfachen.

Diese Tatsache führt dazu, dass aktuell keine sicherheitsrelevante Funktion in einem Serienfahrzeug existiert, die nicht auch mit realen Testfahrzeugen überprüft wurde: Deshalb wird für aktuelle Systeme immer auf den Test mit realen Fahrzeugen, realen Menschen und realer Umwelt zurückgegriffen.

Aus dem notwendigen Einsatz der Realfahrt folgt, dass beispielsweise vor der Freigabe der Mercedes Benz E-Klasse (W212) insgesamt 36 Millionen Testkilometer absolviert wurden [12]³. Nach Fach et al. [13] bedarf allein die Freigabe eines aktuellen Fahrerassistenzsystems bis zu zwei Millionen Testkilometer. Wenn zwischen zwei Aktivierungen der ersten Stufe des EBA bei diesen Testfahrten 50 000 bis 100 000 Kilometer vergingen, wird diese große Zahl an Testkilometern nachvollziehbar. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass die kritischere zweite Stufe des EBA während dieser Testkilometer gar nicht auslöste (s. Aussage in Abb. 21.3). Diese Testkilometer im zweistelligen Millionenbereich gehen einher mit beträchtlichen Kosten für Fahrzeugprototypen, Testfahrer, Testdurchführung sowie deren Auswertung. Der Zeitbedarf lässt sich zwar durch Parallelerprobungen mittels mehrerer Fahrzeuge reduzieren, jedoch entstehen hierbei zusätzliche Kosten für die Fahrzeugprototypen.

Dieses Beispiel zeigt, dass bereits für aktuelle Fahrerassistenzsysteme die Absicherung basierend auf Realfahrten im Straßenverkehr eine ökonomische Herausforderung für den OEM (engl. Original Equipment Manufacturer) darstellt. Besonders vor dem Hintergrund der zunehmenden Funktionalitäten und der Varianten- sowie Versionsvielfalt je Fahrzeugmodell wächst diese Herausforderung. Burgdorf [14] leitet beispielsweise eine Zahl von $160 \cdot 2^{70}$ Varianten für den BMW 318i (E90) mit Komponenten wie beispielsweise Karosserieform, Motor, Getriebe, Abtrieb, Farbe, Klima, Infotainment her.

3 „Hinter [der E-Klasse] liegen umfassende virtuelle Tests mit digitalen Prototypen und insgesamt 36 Millionen Testkilometer“

Deshalb gibt es bereits heute Bestrebungen, andere Testdurchführungen neben der Realfahrt für die finale Absicherung einzusetzen. Das einzige den Autoren dafür bekannte Beispiel betrifft die Homologation von ESC-Systemen. Nach EU-Verordnung ECE-Regelung 13H [15] besteht die Möglichkeit, diese teilweise in der Simulation durchzuführen:

Wenn ein Fahrzeug gemäß Absatz 4 physikalisch geprüft worden ist, kann die Übereinstimmung anderer Versionen oder Varianten desselben Fahrzeugtyps mittels Rechnersimulationen nachgewiesen werden, die die Prüfbedingungen des Absatzes 4 und die Prüfverfahren des Absatzes 5.9 einhalten.

Wohlgemerkt geht es hier allein um das ESC-System. Als Beispiel wird von Baake et al. [16] die Homologation von ESC-Systemen für Vans von Mercedes-Benz in Zusammenarbeit mit Bosch und IPG CarMaker beschrieben: Mithilfe von sogenannten Master Cars wurde in CarMaker ein Fahrzeugmodell erstellt; mit diesen Master Cars wurden Referenzdaten gesammelt und basierend darauf das Simulationsmodell validiert. Damit wurde die simulationsbasierte Empfehlung zur Freigabe für weitere Fahrzeugvarianten mit unterschiedlicher Beladung ermöglicht. Baake et al. berichtet zusätzlich vom Übertragen dieses Vorgehens auf die Funktion Cross Wind Assist (CWA), die jedoch noch nicht für die Absicherung zur Freigabe eingesetzt wurde.

21.3 Anforderungen an ein Testkonzept

Um im Folgenden zu diskutieren, warum die Vollautomatisierung eine besondere Herausforderung für die Freigabe darstellt, werden zunächst die Anforderungen an Testkonzepte für die Freigabe beschrieben. Diese sind unterteilt in Effektivitäts- und Effizienzkriterien.

21.3.1 Effektivitätskriterien

Repräsentativ – valide

Die Anforderung der Repräsentativität hat zwei Aspekte: Auf der einen Seite muss die Testfallgenerierung dafür sorgen, dass die nötige Testabdeckung erreicht wird. Ein Fahrzeug sollte beispielsweise nicht nur bei 20 °C und Sonnenschein getestet werden, da es im realen Einsatz auch Schnee, Regen und Temperaturen unter 0 °C ausgesetzt ist. Außerdem sollten Fahrzeuggrenzmuster (Toleranzen in der Produktion) bei der Testfallgenerierung betrachtet werden. Auf der anderen Seite muss die Testdurchführung den minimal notwendigen Grad an Realität aufweisen. Das bedeutet, dass die Vereinfachung in der Darstellung der Realität weder das Verhalten des Testobjekts noch das Verhalten und die Eigenschaften der Umwelt gegenüber dem realen Verhalten beeinflussen darf.

Variierbar

Die Testdurchführung muss die Möglichkeit bieten, alle von der Testfallgenerierung definierten Testfälle umzusetzen.

Beobachtbar

Besonders für die Testauswertung ist es notwendig, Parameter der Testdurchführung zu beobachten. Nur wenn die Situation auch beschrieben werden kann, besteht die Möglichkeit zur Aussage „Test bestanden“ oder „Test nicht bestanden“.

21.3.2 Effizienzkriterien

Ökonomisch

Die Anforderung des ökonomischen Testkonzepts ist zweigeteilt: Zum einen sollte die Testdurchführung möglichst schnell vorbereitet und durchgeführt sein, um nach Möglichkeit die an der Entwicklung beteiligten Personen direkt mit einer Rückmeldung zum Testobjekt zu versorgen. Zum anderen ist darauf zu achten, dass die Testdurchführung möglichst kostengünstig vorbereitet und durchgeführt wird.

Reproduzierbar

Die Reproduzierbarkeit reduziert gravierend den Aufwand für Regressionstests. Wurde beispielsweise ein Fehler erkannt und das Testobjekt entsprechend modifiziert, ist das Ziel, das Testobjekt im gleichen Szenario erneut einem Test zu unterziehen.

Frühzeitig

Je früher im Entwicklungsprozess ein Produkt aussagekräftig getestet werden kann, desto weniger Entwicklungsschritte müssen bei einem eventuellen Fehler erneut durchlaufen werden.

Sicher

Die Testdurchführung sollte das akzeptierte Risiko aller Testbeteiligten nicht übersteigen. Dies ist besonders bei Realfahrten zu beachten, wenn Verkehrsteilnehmer dem Test ohne Kenntnis ausgesetzt werden.

Die beschriebenen Anforderungen werden durch die aktuellen Testkonzepte ausreichend erfüllt, sodass die vier vorgestellten unterschiedlichen Automatisierungsstufen damit freigegeben werden. Die Rückrufe aller OEM, die Millionen Fahrzeuge betreffen, sind jedoch ein Zeichen dafür, dass diese Testkonzepte keineswegs alles absichern. Sind diese Konzepte auch weiterhin geeignet, um neue Systeme wie das autonome Fahren für den öffentlichen Straßenverkehr abzusichern? An den vorgestellten Anforderungen ändert sich nichts. Wie im Folgenden beschrieben wird, ändert sich jedoch das Testobjekt gravierend.

21.4 Besonderheiten des autonomen Fahrens

Im Folgenden wird zunächst der Unterschied zwischen vollautomatisiertem und aktuellem Fahren im Straßenverkehr erläutert. Daran anschließend wird der Unterschied zwischen den Verkehrssystemen Luftfahrt, Eisenbahn und Straßenverkehr kompakt vorgestellt, der dazu führt, dass nur bedingt Erkenntnisse aus diesen Bereichen übertragen werden können.

21.4.1 Vergleich zwischen aktueller Automatisierung und Vollautomatisierung der Straßenfahrzeuge

Für die zuvor beschriebene Absicherung der vier in Serie vorhandenen Automatisierungsstufen stand das Fahrzeug und speziell dessen Kontrollierbarkeit durch den Fahrer im Fokus. In der kombinierten Darstellung des Drei-Ebenen-Modells für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen [17] und der Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges [18] in Abb. 21.6 entspricht diese Absicherung den grün hinterlegten Elementen. Getestet werden das Fahrzeug und dessen Verhalten in Längs- und Querrichtung; dabei werden nicht das Verhalten oder die Fähigkeiten des zukünftigen Fahrers getestet, sondern ausschließlich die Möglichkeiten für den Testfahrer, mit Lenk- und Beschleunigungseingriffen das Fahrzeug in den Testfällen zu kontrollieren. Deshalb schneidet die grüne Box nur leicht den Bereich, der für den Fahrer steht.

Für die Vollautomatisierung fallen nun die Fähigkeiten des Fahrers weg, er fungiert auch nicht mehr als Rückfallebene. Die Fahraufgabe, also das Navigieren, Bahnführen und Stabilisieren/Regeln, wird vom Fahrroboter übernommen. Das bedeutet, für das autonome Fahren gibt es keinen Test der Kontrollierbarkeit, sondern ausschließlich den Test der Funktionalität eines technischen Systems. Auf der einen Seite erleichtert es den Test, denn die Unsicherheiten und individuellen Unterschiede des Menschen sind nicht mehr durch den Test abzudecken. Auf der anderen Seite entfällt die Möglichkeit, von Testfällen und Testfahrern auf weitere Anwendungsfälle zu schließen. Für das System entfällt der Mensch, der im Allgemeinen fertigkeitsbasiert, regelbasiert sowie wissensbasiert handelt.

Für die Absicherung aktueller Systeme ist eine Sicherheit nachzuweisen, die sich durch Fahrer und das Fahrzeug in Kombination ergibt; für die Freigabe des Fahrzeugs steht dabei aber aktuell ausschließlich das Fahrzeug im Fokus. Zusätzlich angenommen, aber nicht getestet wird die „Zuverlässigkeit“ des Fahrers. Bei der Absicherung des autonomen Systems ergibt sich die Sicherheit nun ausschließlich aus dem technischen System Fahrroboter und Fahrzeug (gelbes Feld der Abb. 21.6), die es nachzuweisen gilt.

Aus Abb. 21.6 wird ersichtlich, dass dafür zum einen die Aufgabenquantität steigt, die es abzusichern gilt: Der Fahrroboter wird für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete (s. Use-Cases Kap. 2) wie Navigieren, Bahnführen und Stabilisieren/Regeln benötigt. Diese Aufgabenquantität wird besonders im öffentlichen Raum ohne Zugangsbeschränkung eine Herausforderung. Auf der anderen Seite ändert sich die Aufgabenqualität des technischen Systems. Aktuelle Systeme sind lediglich ausführend bzw. ständig durch den

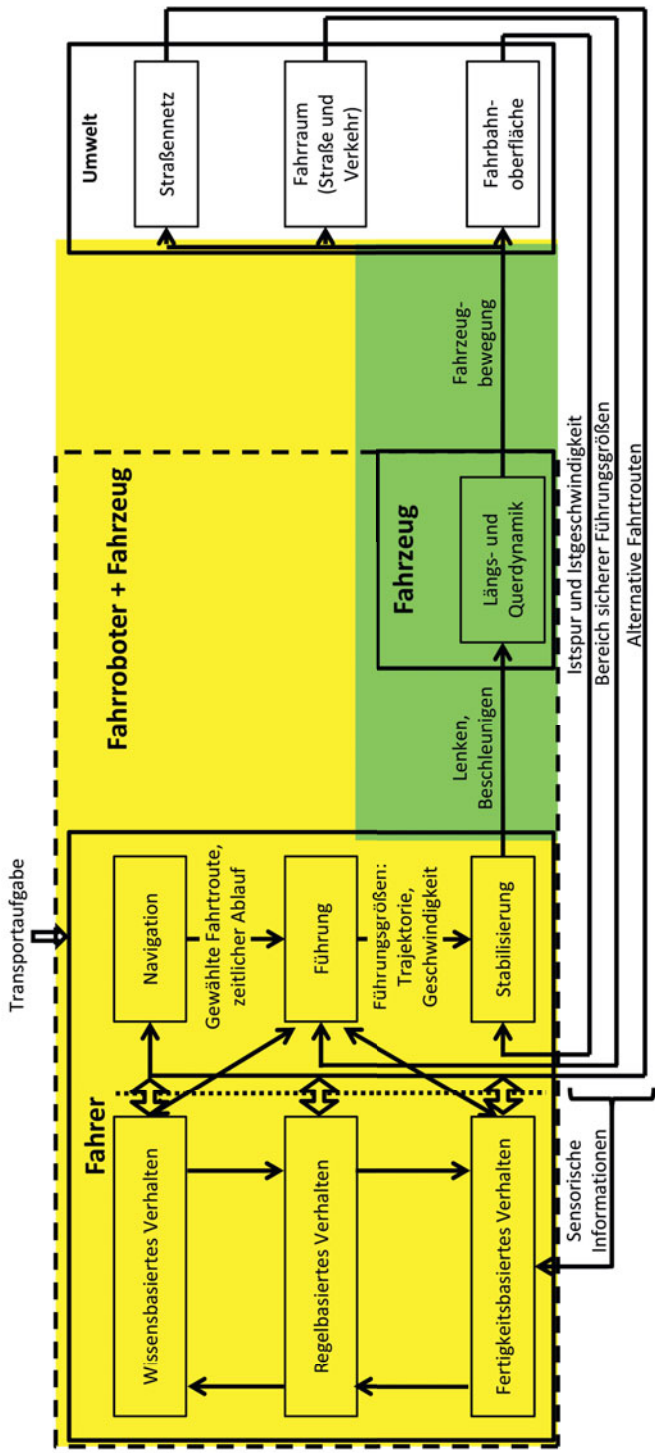


Abb. 21.6 Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen und Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges basierend auf [17, 18]

Menschen überwacht, für das autonome System muss die Ausführung einer Aufgabe jedoch den Ansprüchen an die zu Beginn diskutierte Sicherheit genügen.

21.4.2 Vergleich der Bedingungen in der Luftfahrt, im Straßenverkehr und im Eisenbahnverkehr

Neben dem Straßenverkehr existieren weitere Verkehrssysteme, bei denen die Automatisierung der Bedienung Einzug gehalten hat. Inwieweit jedoch die Herausforderungen und Lösungen aus diesen Bereichen auf die Fahrzeugautomatisierung übertragbar sind, wird im Folgenden diskutiert.

Die Automatisierung in der (zivilen) Luftfahrt liefert aktuell keine Beispiele der Vollautomatisierung. Auch wenn die Piloten nur äußerst selten tatsächlich der Flugaufgabe nachgehen, sind diese dennoch als Überwacher und Bediener vorhanden. Eine Übersicht über die Unterschiede der Verkehrssysteme findet sich in Tab. 21.1, die Weitzel et al. [9] und Ständer [19] entnommen wurde. Für die Absicherung ist diesbezüglich besonders das Sicherheitskonzept des Verkehrsablaufs von Interesse, denn hier zeigen sich die Unterschiede zwischen Luftfahrt und Straßenverkehr. Die Luftfahrt operiert in einem gesetzlich abgeschlossenen Verkehrsraum, ein Kollisionswarnsystem ist verpflichtend und eine externe Überwachung des Betriebs ist durch die Flugsicherung vorhanden.

Das Verkehrssystem der Eisenbahn bietet Beispiele der Vollautomatisierung: Beispielsweise wird in Nürnberg eine automatisierte U-Bahn betrieben. Jedoch unterscheidet sich auch für dieses Verkehrssystem nach Tab. 21.1 besonders das Sicherheitskonzept des Verkehrsablaufs zwischen Straßenverkehr und Eisenbahn. Für den Bahnverkehr existiert ein gesetzlich abgeschlossener Verkehrsraum, zusätzlich wird mit Logiksystemen und einer externen Überwachung gearbeitet, um die Kollision von zwei Zügen zu vermeiden.

Der Straßenverkehr als Mischbetrieb liefert die Bedingung des abgeschlossenen Verkehrsraumes und der externen Überwachung nicht. Diese Unterschiede zeigen, warum Lösungen für die Freigabe nicht direkt auf das autonome Fahren übertragen werden können.

Mit diesem Vergleich soll nicht ausgeschlossen werden, dass sämtliche Lösungen aus der Luftfahrt und dem Eisenbahnverkehr für den Straßenverkehr uninteressant sind. Sicherlich existieren ähnliche Problemstellungen wie beispielsweise die Zuverlässigkeit von sicherheitsrelevanten Komponenten.

21.5 Freigabeherausforderung für das vollautomatisierte Fahren (Freigabefälle)

Wie dargestellt wurde, unterscheidet sich die Funktion des autonomen Fahrens als Testobjekt grundlegend von den aktuellen Straßenfahrzeugen, aber auch von Bewegungsmitteln im Luft- und Eisenbahnverkehr. Deshalb wird nun ermittelt, welche Aussagekraft die vorgestellten aktuellen Testkonzepte übertragen auf das autonome Fahren besitzen

Tab. 21.1 Vergleich der Bedingungen der Verkehrssysteme (entnommen [9], basierend auf [18])

	Luftfahrt	Straßenverkehr	Eisenbahnverkehr
Bewegungsoptionen	3-D (Raum)	2-D (Fläche)	1-D (Linie)
Bediener			
verantwortlicher Fahrzeugführer	meist redundant	nicht redundant	nicht redundant
Professionalität der Fahrzeugführer	fast vollständig hauptberuflich	geringer Anteil hauptberuflich	fast vollständig hauptberuflich
Ausbildung			
Theorie	> 750 Stunden	> 21 Stunden	~ 800 Stunden
Praxis	> 1500 Stunden	> 9 Stunden	~ 400 Stunden
Schulung auf Fahrzeugtyp	ja	nein	ja
Weiterbildung	erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich
Sicherheitskonzepte des Verkehrsablaufs			
Verkehrsraum abgeschlossen	gesetzlich festgelegte Begrenzungen	in Sonderfällen	gesetzlich festgelegte Begrenzungen
Fahrt auf Sicht	nein, nur in Sonderfällen	ja	nein, nur in Sonderfällen
technische Vorrichtungen (Beispiele)	Kollisionswarnsysteme verpflichtend	Fahrbahnmarkierung, Lichtsignalanlagen, Beschilderung	Sicherheitsfahrerschaltungen, punktförmige Zugbeeinflussung, automatische Fahr- und Bremssteuerung
externe Überwachung	ja, Flugsicherung	nein	ja, Fahrdienstleitung, Betriebszentrale
Technische Rahmenbedingungen			
Dokumentation Fahrten/ Betriebsstunden	ja	nein	Überwachung der Laufleistung, automatische Fahrtenschreiber
Instandhaltung, Reparatur	nur von zertifizierten Betrieben	Werkstätten, Selbsthilfe	nur von zertifizierten Betrieben, dann auch kleine Werkstätten
Unfallanalyse	jeder Unfall/ schwere Störung, durch unabhängige staatliche Stelle	in Einzelfällen, durch zertifizierte Gutachter	jeder Unfall/ schwere Störung, durch unabhängige staatliche Stelle
Stückzahlen (in Europa)	10 ³ (fallend)	10 ⁶ (steigend)	10 ³ (fallend, bei steigender Fahrleistung pro Triebfahrzeug)
Modellwechsel	ca. 20 Jahre	ca. 5–7 Jahre	ca. 20 Jahre für Triebfahrzeuge

würden. Des Weiteren wird diskutiert, welche Auswirkungen es hätte, wenn weiterhin am aktuellen Testkonzept festgehalten würde.

21.5.1 Aussagekraft des aktuellen Testkonzepts für das autonome Fahren

Es wurde bereits dargelegt, dass ein Testkonzept aus Testfallgenerierung und Testdurchführung besteht. Nun wird diskutiert, wie und ob beides auf das autonome Fahren übertragbar ist.

Testfallgenerierung

Die drei Verfahren zur Testfallgenerierung wurden in Abschn. 21.2 bereits kurz erläutert; diesen Verfahren liegt die Annahme der Fahrfähigkeit des Fahrers zugrunde. Ob ein beliebiger Fahrer das Testobjekt kontrollieren kann, wird an die gesetzlich vorgeschriebene Fahrerlaubnis geknüpft. Diese Fahrerlaubnis wird nach Straßenverkehrsgesetz (§ 2 Abs. 2 StVG) nur dann erteilt, wenn u. a. der Bewerber

- ein Mindestalter erreicht hat,
- zum Führen von Kraftfahrzeugen geeignet ist,
- ausgebildet wurde und
- theoretische wie praktische Tests bestanden hat.

Unter „geeignet“ wird nach § 2 Abs. 4 StVG Folgendes verstanden:

Geeignet zum Führen von Kraftfahrzeugen ist, wer die notwendigen körperlichen und geistigen Anforderungen erfüllt und nicht erheblich oder nicht wiederholt gegen verkehrsrechtliche Vorschriften oder gegen Strafgesetze verstoßen hat.

Aufgrund dieser geforderten Fahrfähigkeit des Fahrers wird die Testfallgenerierung auf Beispielsituationen beschränkt: Angenommen wird, dass, wenn der Testfahrer diese Beispielsituationen bewältigen kann, er bzw. jeder andere Fahrer mit Fahrerlaubnis auch die weiteren nicht getesteten relevanten Situationen im Einsatz bewältigen wird. Dazu gehören Situationen, in denen der Fahrer aktiv fährt, aber auch jene Situationen, in denen der Fahrer überwacht und das System gegebenenfalls übersteuert. Somit bieten die Testfälle in Kombination mit der Fahrerlaubnisprüfung eine Metrik, die eine Aussage über die Sicherheit des Systems Fahrer – Fahrzeug erlaubt. Wie die praktische Fahrerlaubnisprüfung als Bewertungsgrundlage zur Beurteilung der Fahrbefähigung optimiert werden könnte, wird von Bahr [20] diskutiert.

Durch den Wegfall des Fahrzeugführers entfällt die aktuell akzeptierte Metrik, und somit ist die Raffung der Testfälle nicht mehr zulässig. Die Testfallgenerierung für das autonome Fahren muss gerade die Fahrfähigkeiten – eine neue Qualität von Funktionen – abdecken, die der Mensch zuvor mit in das Fahrer-Fahrzeug-System eingebracht hat. Der theoretische und der praktische Test der Fahrerlaubnisprüfung stellen dabei nicht die Schwierigkeit dar.

Die folgenden Paragraphen – § 10 Mindestalter, § 11 Eignung und § 12 Sehvermögen der Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV) – stellen jedoch die Herausforderung dar. Diese Paragraphen stehen damit implizit für umfassende Anforderungen an die Eigenschaften des Menschen, die Fahraufgaben auszuführen. Der Mensch, der diese Anforderungen erfüllt, hat

- als Verkehrsteilnehmer Hunderttausende von Kilometern erlebt,
- als Teil der Gesellschaft deren Sozialverhalten erfahren,
- kognitive Fähigkeiten erlernt,
- sensomotorische Fähigkeiten trainiert usw.

Aktuell ist den Autoren keine Methode bekannt, diese Funktionen für ein technisches System valide zu testen. Somit fallen die akzeptierte Metrik sowie die Raffung der Testfälle weg, wenn der Mensch aus der Verantwortung für die Fahraufgabenausführung genommen wird. Die aktuellen Testfälle besitzen für die Freigabe des autonomen Fahrens keine Aussagekraft, sodass die Testfallgenerierung an das neue System anzupassen ist.

Testdurchführung

Wie bereits dargelegt, werden für die Testdurchführung unterschiedliche Methoden von Hardware-in-the-Loop (HiL) über Software-in-the-Loop (SiL) bis zur Realfahrt eingesetzt. Dabei stellt die Realfahrt aktuell die wichtigste Methode für die Freigabe dar; Ursache hierfür ist vor allem die Validität bei bisher noch vertretbarem ökonomischem Aufwand. Das autonome Fahren stellt jedoch auch, neben dem ökonomischen Aufwand, für die bekannten Methoden eine systematische Herausforderung dar. Aktuell steht die Realfahrt für die Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr mit Testfahrer. Die Aufgabe des Testfahrers ist es, entsprechend der Aufgabe des Fahrzeugnutzers das Fahrzeug in jeder Situation zu führen oder zu überwachen. Übertragen auf das autonome Fahren wäre der Einsatz des Testfahrers am Fahrerarbeitsplatz ein nichtreales Verhalten eines Nutzers, denn dieser muss eben nicht mehr das Fahrzeug und das Umfeld überwachen und eingreifen. Außerdem könnte das Fahrzeug auch ohne Insassen am Straßenverkehr teilnehmen (abhängig vom Use-Case), sodass ein Testfahrer eine nichtreale Komponente im Fahrzeug darstellen würde. Deshalb besteht die Gefahr, dass durch den Einsatz eines Testfahrers die anderen Verkehrsteilnehmer beeinflusst werden und ein verändertes Verhalten zeigen. Weitere Gedanken zu diesem Thema sind in Kap. 7 zu finden.

Somit ist neben der Testfallgenerierung auch die aktuelle Testdurchführung nicht direkt auf das autonome Fahren übertragbar.

21.5.2 Millionen Kilometer auf öffentlichen Straßen bis zur Freigabe des vollautomatischen Fahrens

Folgende theoretische Betrachtung wird zeigen, was es bedeutet, trotz aufgezeigter Unterschiede dennoch das aktuelle Testkonzept beizubehalten. Angenommen, eine Raffung der

Testfälle für das autonome Fahren ist nicht möglich, da keine Methode, ähnlich der Fahrerlaubnisprüfung des Menschen, existiert. Dennoch ist das Ziel, eine Aussage zu treffen, ob das Risiko durch den Einsatz des autonomen Fahrzeugs erhöht wird oder nicht:

$$V_{akz} = \frac{R_{zus}}{R_{ver}} < 1.$$

Hier sei noch einmal darauf hingewiesen, dass diese Bedingung in keiner Weise zwingend ist. Für die theoretische Betrachtung wird die Bedingung kleiner eins jedoch als *worst case* angenommen.

Die einzige den Autoren bekannte belastbare Metrik für das Aufstellen eines solchen Verhältnisses sind die Zahlen der nachträglichen Auswertung von Verkehrsunfällen. Für Deutschland sind dies beispielsweise die Zahlen des Statistischen Bundesamtes. Für 2012 gibt das Statistische Bundesamt [21] beispielsweise 3375 polizeilich erfasste Unfälle mit Getöteten in Deutschland an. Dabei wird mit der Zahl für Getötete gearbeitet, da dies den *worst case* für den zu erbringenden Nachweis darstellt. Bezogen auf eine Fahrleistung von 709 Milliarden Kilometern in Deutschland, bedeutet diese Zahl als Durchschnittswert, dass zwischen zwei Unfällen mit Getöteten 210 Millionen Kilometer liegen. Da die Zahlen lediglich einen Erwartungswert darstellen, existieren auch Strecken zwischen zwei Unfällen, die kürzer oder länger sind. Um diese Verteilung der Unfallereignisse darzustellen, wird die Poisson-Verteilung herangezogen:

$$P_{\lambda}(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}.$$

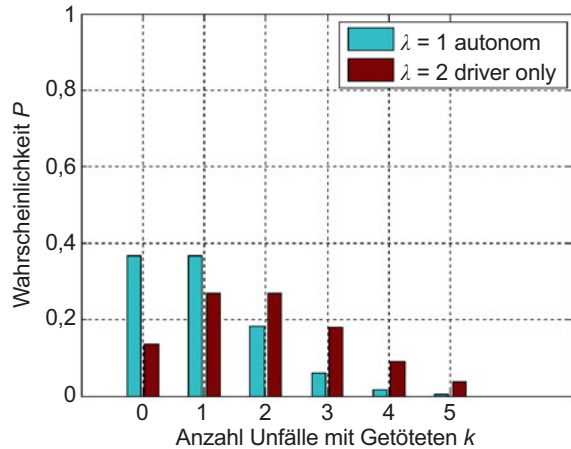
Dabei wird angenommen, dass das Auftreten eines Unfalls ein unabhängiger und nicht erschöpfender Zufallsprozess ist $P_{\lambda}(k)$. In der Gleichung entspricht k der Anzahl an Unfallereignissen und λ dem Erwartungswert, mit dem dieses Ereignis auftritt. Der Erwartungswert λ ist definiert durch den Quotienten

$$\lambda = \frac{s_{test}}{s_{leist}},$$

wobei s_{test} für die beobachteten Testkilometer steht und s_{leist} für die Leistungsfähigkeit des Systems. Die Leistungsfähigkeit steht für die erwartete Anzahl von Kilometern zwischen zwei Unfällen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für $k = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]$ und $\lambda = [1 \ 2]$ sind in Abb. 21.7 als Beispiel abgebildet.

Aus der Abbildung ist die Problematik für den Nachweis des Risikos gut zu erkennen: Angenommen, die blaue Verteilung steht für ein autonomes Fahrzeug und die rote Verteilung für ein Driver-Only-Fahrzeug. Beide Fahrzeuge werden die gleiche Anzahl von Testkilometern bewegt $s_{test} = a_s \cdot \bar{s}$, mit dem Streckenfaktor $a_s = 2$ und dem durchschnittlichen Abstand \bar{s} zwischen zwei Unfällen mit Getöteten. Die Leistungsfähigkeit $s_{leist} = a_{leist} \cdot \bar{s}$

Abb. 21.7 Poisson-Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Anzahl von Unfällen mit unterschiedlichen Erwartungswerten



des autonomen Fahrzeugs ist um den Leistungsfaktor $a_{leist} = 2$ größer als die des Driver-Only-Fahrzeugs. Daraus folgt für das autonome Fahrzeug der Erwartungswert $\lambda = 1$ und für das Driver-Only-Fahrzeug $\lambda = 2$.

Obwohl das autonome Fahrzeug gemäß der vorherigen Annahme eine doppelte Leistungsfähigkeit wie das Driver-Only-Fahrzeug auszeichnet, geriet das autonome Fahrzeug während des Tests in einen Unfall mit Getöteten (Wahrscheinlichkeit $P_1(1) = 1 \cdot e^{-1} \approx 0,37$), das Driver-Only-Fahrzeug jedoch nicht (Wahrscheinlichkeit $P_2(0) = 1 \cdot e^{-2} \approx 0,14$). Eine Aussage, dass das autonome Fahrzeug unsicherer sei als das Driver-Only-Fahrzeug, ist dementsprechend infrage zu stellen. Dieses Beispiel zeigt, dass auf jeden Fall ein Streckenfaktor a_s größer zwei notwendig ist, um mit einer ausreichend hohen Signifikanz eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des autonomen Fahrens treffen zu können.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist beispielsweise von einer fünfprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit auszugehen und somit auch das gleiche Signifikanzniveau $e = 5\%$ heranzuziehen. Der Streckenfaktor a_s ist in Abhängigkeit der Anzahl an Unfällen entsprechend groß zu wählen, sodass die Wahrscheinlichkeit für ein Fahrzeug mit geringerer Leistungsfähigkeit kleiner fünf Prozent wird, diese geringe Anzahl von Unfällen zu erreichen. Abb. 21.8 zeigt das Ergebnis dieser Überlegung und der numerischen Berechnung der Werte.

Der Datenpunkt bei null Unfällen mit Getöteten bedeutet, dass mit einem Streckenfaktor von $a_s \approx 3$ die Wahrscheinlichkeit kleiner fünf Prozent ist, dass ein schlechteres Fahrzeug als die Vergleichsgruppe in keinen Unfall mit Getöteten verwickelt ist.

Unglücklicherweise ist die Erfolgswahrscheinlichkeit für diesen Test genauso gering. Denn ist das Testfahrzeug genauso gut wie die Vergleichsgruppe, also gilt Leistungsfaktor $a_{leist} = 1$, dann folgt daraus eine Erfolgswahrscheinlichkeit für diesen Nachweis von ebenfalls nur fünf Prozent. Damit der Test gelingt, ist eine größere Erfolgswahrscheinlichkeit erstrebenswert. Als Beispiel wird nun eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 50 Prozent gefordert, mit der ein Test zeigen soll, dass das Testfahrzeug nicht schlechter als die Ver-

Abb. 21.8 Streckenfaktor bei Signifikanzniveau fünf Prozent

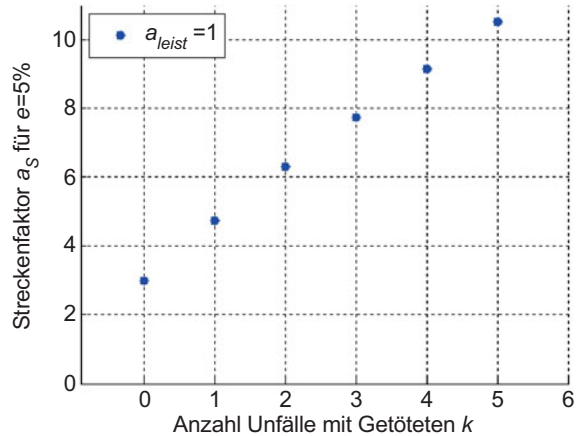
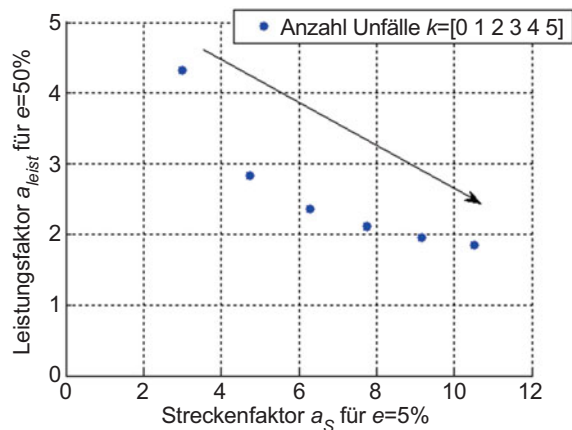


Abb. 21.9 Streckenfaktor über Leistungsfaktor bei einem Signifikanzniveau von fünf Prozent und einer Erfolgswahrscheinlichkeit des Tests von 50 Prozent



gleichsgruppe ist. Dazu muss das Testfahrzeug leistungsstärker sein als die Testgruppe. Abb. 21.9 zeigt das Ergebnis dieser Überlegung.

Der erste Punkt steht für folgende Aussage: Wenn das Testfahrzeug ca. 4,3-mal besser als die Vergleichsgruppe ist, dann gelingt der Test mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit, dass das Testfahrzeug mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von fünf Prozent besser als die Vergleichsgruppe ist.

Was dieses Ergebnis nun für die Testfahrt mit dem autonomen Fahrzeug bedeutet, wird an der Strecke zwischen zwei Unfällen mit Getöteten von 210 Millionen Kilometern demonstriert. Der letzte Punkt in Abb. 21.9 enthält die Aussage: Wenn das autonome Fahrzeug ca. zweimal so gut ist ($a_{leist} \approx 2$) wie das Vergleichssystem (aktuelle Fahrzeuge), dann muss eine Teststrecke von mindestens 2,1 Milliarden Kilometern zurückgelegt werden ($s_{test} = a_s \cdot 210 \text{ Mio km}$). In diesem Fall wurde der Nachweis mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit erbracht, allerdings wurden auch mit der gleichen Wahrscheinlichkeit fünf Unfälle erfahren.

Aus dieser Überlegung folgt ironischerweise, dass je leichter die Fahrzeugführung ist, desto mehr Testkilometer absolviert werden müssten, da der Vergleichswert entsprechend größer ist. Für den Autobahnpiloten folgt aus den aktuellen Zahlen des Statistischen Bundesamtes ein Vergleichswert von 662 Millionen Kilometern zwischen zwei Unfällen mit Getöteten. Dementsprechend müssten 6,62 Milliarden Testkilometer auf der Autobahn absolviert werden, um den dargestellten Bedingungen zu entsprechen.

Dieser theoretische Exkurs in die Statistik zeigt, dass die Freigabe zur Herausforderung, wenn nicht sogar zur Falle für das autonome Fahren werden kann. Dabei wurden mehrere Faktoren für die Ermittlung der Testkilometer noch nicht adressiert; beispielsweise würde eine Variation des Systems zu einem erneuten Fahren der Testkilometer führen, oder der Test mit und ohne Insassen könnte mit einem Faktor zwei in die Berechnung eingehen. Wie sich die unterschiedlichen, hier nicht betrachteten Parameter wie Einsatzbereich, Unfallfortgentyp, Unfallverursachung und Vergleichsfahrzeuge auf die ermittelten notwendigen Kilometer auswirken, wird in Winner [22] detailliert hergeleitet.

Bei diesen Überlegungen handelt es sich um eine theoretische Betrachtung mit frei getroffenen Annahmen. Dennoch eignet sich dieser Ansatz, um die Problematik und die Herausforderungen aufzuzeigen sowie die nun folgenden Ansätze zu motivieren.

21.6 Ansätze für das Lösen der Freigabeherausforderung

Wie gezeigt wurde, bildet das autonome Fahren ein neues Testobjekt, das aufgrund seiner Eigenschaften den Einsatz der klassischen Testkonzepte infrage stellt. Das Überwinden der beschriebenen Freigabeherausforderung bedarf neuer Ansätze: Dementsprechend wird im nächsten Unterabschnitt diskutiert, warum aus Sicht der Freigabe das Wiederverwenden von freigegebenen Funktionen und somit ein evolutionärer Ansatz notwendig erscheint. Daran anschließend werden existierende Ansätze diskutiert, die eine Beschleunigung der Freigabe ermöglichen könnten.

21.6.1 Wiederverwenden freigegebener Funktionen

Die erste und einfachste Möglichkeit, eine Freigabe für ein neues System zu erhalten, ist das Wiederverwenden von bereits freigegebenen Funktionen. Wird ein System in gleicher Weise wie zuvor eingesetzt, so kann die bereits erteilte Freigabe übernommen werden. Ein erweiterter Funktionsumfang ist jedoch neu abzusichern; je kleiner dabei der neue Bereich ist, desto geringer wird der Aufwand.

Dieser Argumentation folgend scheint eine Evolution über alle Dimensionen als möglicher Ansatz, um die Freigabeherausforderung zu beherrschen. Mit den Dimensionen ist hier beispielsweise die Geschwindigkeit, der Einsatzbereich, aber auch der Automationsgrad gemeint. Bei der Wahl der Evolutionsschritte können zwei Ansichten unterschieden werden: Aus Sicht eines Funktionsentwicklers ist die Autobahn während

eines Stauszenarios aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit und der begrenzt zugänglichen Szenerie ein geeignetes Einstiegszenario. Aus Sicht der zuvor angestellten statistischen Überlegungen wäre ein Einstiegszenario sinnvoll, bei der der Mensch als Vergleichsgruppe möglichst schlecht abschneidet, also möglichst viele Fehler macht. Möglichst viele Fehler bedeutet wenig Strecke, sodass der Nachweis der Leistungsfähigkeit einfacher wird.

Der revolutionäre Schritt – ein autonomes Fahrzeug ohne evolutionäre Zwischenschritte abzusichern – widerspricht diesem Ansatz und scheint unwahrscheinlich.

21.6.2 Beschleunigung der Freigabe

Trotz des evolutionären Ansatzes sind dennoch neue Funktionen abzusichern. Um dies zu beschleunigen, sind prinzipiell zwei Stellschrauben vorhanden: Erstens kann das Was und zweitens das Wie verändert werden. Welche Testfälle sind notwendigerweise zu überprüfen und womit werden diese Tests durchgeführt? Schuldt et al. [10] nennen dies Testfallgenerierung und Testdurchführung.

21.6.2.1 Testfallgenerierung

Die Testfallgenerierung definiert die durchzuführenden Tests: Nach Schuldt et al. [10] folgt aus der Vielzahl von Einflussfaktoren im Einsatzbereich sowie deren Wertebereichen eine unüberschaubare Anzahl von Testfällen. Wie bereits beschrieben, stützen sich Systeme, die aktuell im Einsatz sind, auf die Leistungsfähigkeit des Menschen und dessen Möglichkeit, das Fahrzeug zu kontrollieren. Daraus folgt eine starke Raffung der theoretisch notwendigen Testfälle. Somit existiert eine Metrik, die eine Aussage über die Sicherheit ermöglicht, ohne sämtliche Situationen zu testen. Diese Raffung entfällt für das autonome Fahrzeug, sodass neue Wege gesucht werden, die Anzahl von Testfällen für das autonome Fahrzeug zu reduzieren. Dabei sind während der Testfallgenerierung die Anforderungen an ein Testkonzept aus Abschn. 21.3 zu beachten. Besonders die Repräsentativität ist gefährdet, wenn Testfälle gestrichen werden.

Die Ansätze von Glauner [23] und Eckstein [24] beschreiben dafür das Identifizieren von relevanten bzw. kritischen Situationen im öffentlichen Straßenverkehr: Basierend auf zuvor definierten Ereignisklassen werden während der Testfahrten oder groß angelegter Feldstudien potenziell kritische Situationen identifiziert. Diese kritischen Situationen fließen in die Testfallgenerierung ein, sodass Situationen geringer Kritikalität gestrichen werden können. Dieser Raffung liegt die Annahme zugrunde, dass Situationen, die weniger kritisch sind, durch kritische Situationen abgedeckt werden. Dabei bleibt aktuell als unge löste Aufgabe die Suche nach einem validen Risikomaß, das im ersten Schritt eine Bewertung und im zweiten Schritt die Auswahl von kritischen Situationen ermöglicht.

Ein anderes Vorgehen zur Raffung von Testfällen bieten Schuldt et al. [10]: Vorgeschlagen wird eine generische Testfallgenerierung, bei der Verfahren des Black-Box-Testings und der Kombinatorik eingesetzt werden, um die Einflussfaktoren auf die vom System ausgehende

Eine Alternative ist das Testen von realen Fahrzeugen in einem künstlichen Umfeld: Dies entspricht der Fahrt auf einem Testfeld, denn dort sind zum einen Situationen künstlich hergestellt und zum anderen besitzen die „Verkehrsteilnehmer“ das Bewusstsein, sich in einem Test zu befinden. Zugunsten der Sicherheit, Variierbarkeit, Beobachtbarkeit sowie der Reproduzierbarkeit wird die Realität vereinfacht. Aus ökonomischen Gesichtspunkten werden zwar Testfälle gezielt getestet und müssen nicht wie in Realfahrten per Zufall erfahren werden, jedoch bedarf der Aufbau des Testfelds zusätzliche zeitliche wie finanzielle Mittel.

Des Weiteren könnte sich ein künstliches Fahrzeug in einem realen Umfeld bewegen; künstlich bezieht sich in diesem Fall beispielsweise auf die Ausstattung des autonomen Fahrzeugs mit einem Überwacher, der die Möglichkeit hat, in die Fahraufgabe einzugreifen. Dies kann zum einen ein Testfahrer mit Lenkrad und Pedalerie sein oder aber ein technisches System, das aufgrund von leistungsfähigerer (Zusatz-)Sensorik dem Seriensystem überlegen ist. Werden Komponenten künstlich dargestellt, leidet darunter die Realitätsnähe, jedoch wird an Sicherheit, Reproduzierbarkeit und Beobachtbarkeit gewonnen.

Neben der Möglichkeit, Umfeld und Fahrzeug künstlich zu gestalten, existieren Werkzeuge, die sich einer virtuellen Repräsentation in Form von Computersimulationen bedienen. Dabei sind die zwei Felder, die real und virtuell kombinieren, grau hinterlegt, da diese streng genommen nicht existieren, denn Sensoren und Steller haben genau die Aufgabe der Wandlung zwischen virtuellen und realen Signalen. Ein realer Radarsensor kann kein virtuelles Umfeld sensieren, und ein virtueller Wechselrichter kann keine reale Spannung erzeugen.

Was jedoch möglich ist, sind Kombinationen aus künstlichem und virtuellem Umfeld bzw. Fahrzeug: Als Beispiel dafür existieren unterschiedliche Konzepte von Vehicle-in-the-Loop (ViL). Um den Kreis aus Aktionen und Reaktionen von Umfeld und Fahrzeug zu schließen, werden reale Komponenten in der Simulation in Form von Modellen abgebildet. Dabei werden entweder die angesprochenen Sensoren bzw. Steller stimuliert, also künstlich angeregt; Beispiele hierfür sind simulationsbasierte Videos als Stimulanz für Kamerasysteme oder Rollenprüfstände als Stimulanz für Antriebssteller. Oder die Testwerkzeuge simulieren direkt die Leistungssignale wie z. B. die elektromagnetische Welle und versuchen, reale Effekte von Sensoren und Stellern in der Simulation mithilfe von Modellen darzustellen. Für weitere Informationen dazu s. Bock [27] oder Hendricks [28]. Der beschriebene Einsatz von Modellen stellt die Aussagekraft dieser Testwerkzeuge infrage. Um valide Aussagen mithilfe solcher Modelle zu erhalten, ist der Nachweis zu erbringen, dass diese Modelle keine unzulässigen Vereinfachungen beinhalten; „unzulässig“ ist hier im Kontext der Funktion zu sehen und bedeutet, dass Abweichungen von der Realität nur unterhalb der Toleranzen der Funktion zulässig sind. Wenn jedoch diese Validität nachgewiesen wurde, erlaubt das Testwerkzeug eine größere Sicherheit bei der Testdurchführung, da sich Teile des Umfelds und das Fahrzeug nur noch in der virtuellen Welt begegnen. Aufgrund der virtuellen Komponenten sind diese Testwerkzeuge von einer größeren Variierbarkeit, Beobachtbarkeit und Reproduzierbarkeit gekennzeichnet. Aus ökonomischer Sicht besitzt dieses Testwerkzeug den Vorteil, das virtuelle Umfeld einfach zu variieren

oder aber das Fahrzeug in unterschiedlichsten Varianten darzustellen. Von ökonomischem Nachteil könnte sich die Validierung der Modelle erweisen (vgl. Herausforderung bei SiL). Ein Vorteil dieses Testwerkzeugs ist die Möglichkeit, basierend auf dem simulierten Fahrzeug, bereits frühzeitig in der Entwicklung Tests durchzuführen.

Die letzte Stufe der Abstraktion repräsentiert die Kombination eines virtuellen Fahrzeugs und des virtuellen Umfelds: Das mit Software-in-the-Loop (SiL) bezeichnete Testwerkzeug stellt dabei den geschlossenen Regelkreis durch die Modellierung relevanter Komponenten in der Simulation dar. Anders als bei den Testwerkzeugen zuvor, ist die gesamte Testwelt virtuell. Die Tests sind sicher, variierbar, beobachtbar und reproduzierbar; außerdem besteht die Möglichkeit, dieses Werkzeug bereits frühzeitig in der Entwicklung einzusetzen. Den ökonomischen Vorteil bildet die Hardware-Unabhängigkeit, denn somit ist keine Verknüpfung an die Echtzeit mehr vorhanden. Die Ausführung der Tests wird rein durch Rechenleistung begrenzt; Simulationen können Tag und Nacht sowie massiv parallel erfolgen. Demgegenüber steht die Realitätsnähe der virtuellen Testwelt und somit jedes einzelnen Modells: Nur wenn die Validität der eingesetzten Modelle nachgewiesen wurde, besitzen virtuelle Tests die Aussagekraft für eine Freigabe. Dementsprechend muss für die ökonomische Betrachtung von simulationsbasierten Verfahren vor allem die Validierung der Modelle betrachtet werden.

Die gleiche Herausforderung existiert für den Einsatz von formalen Methoden. Mitsch schreibt diesbezüglich: “We do ... prove that collisions can never occur (as long as the robot system fits to the model).” [26] Das bedeutet, auch für formale Methoden bedingt der Realitätsgrad der eingesetzten Modelle die Aussagekraft der Ergebnisse. Eine besondere Herausforderung und somit im Fokus der Forschung steht beispielsweise die Formalisierung der Unsicherheiten von Sensoren oder der Eigenschaft von weiteren Verkehrsteilnehmern.

Die Diskussion der Testwerkzeuge zeigt das Potenzial, die Freigabe zu beschleunigen: Mithilfe von künstlich erzeugtem Umfeld und Fahrzeug können Testfälle gezielt aufgebaut und angefahren werden. Zusätzlich ermöglicht der virtuelle Ansatz, die Tests abhängig von der eingesetzten Rechenleistung zu beschleunigen und zu parallelisieren.

Die Diskussion zeigt aber auch, dass die Validität und somit die Aussagekraft der Tests mit Einführung von künstlichen und virtuellen Komponenten zur Herausforderung wird.

21.7 Fazit

Das autonome Fahren unterscheidet sich besonders durch den Wegfall des menschlichen Überwachers von assistierten oder teilautomatisierten Systemen und dessen Fähigkeiten zur Korrektur dieser Systeme. Die Metrik, bestehend aus Realfahrt und Fahrerlaubnistest, die eine Aussage über die Sicherheit aktuell in Serien befindlicher Automatisierungsgrade ermöglicht, ist für das autonome Fahren nicht mehr gültig. Der daraus folgende Wegfall der Raffung von Testfällen führt dazu, dass aktuelle Testkonzepte nicht geeignet sind, um das neue System des autonomen Fahrens abzusichern. Das Festhalten an aktuellen Testkonzepten würde zu einem ökonomisch nicht vertretbaren Aufwand führen und zur Frei-

gabefälle für das autonome Fahren werden. Die Autoren sehen jedoch drei Ansätze, diese Freigabefälle zu umgehen:

Erstens erscheint der evolutionäre Ansatz oder alternativ die Transformation (s. Kap. 10) als notwendig, denn nur die schrittweise Einführung entlang der unterschiedlichen Dimensionen Geschwindigkeit, Szenerie und Automationsgrad ermöglicht das Übernehmen von abgesicherten Komponenten und reduziert den Aufgabenumfang der folgenden Freigaben. Zweitens sind die notwendigen Testfälle, basierend auf Felderfahrung und statistischen Verfahren zu raffen. Die Herausforderung ist dabei die Metrik, die eine Aussage über die Sicherheit des Systems in Abhängigkeit der absolvierten Testfälle ermöglicht. Drittens sind alternative Testwerkzeuge neben der Realfahrt einzusetzen. Dabei wird erwartet, dass auf Realfahrten nicht vollständig verzichtet werden kann, denn die Verlagerung von Testfällen in ViL, SiL bzw. in Verfahren des formalen Beweises von Sicherheit bedarf den Nachweis der Validität.

Abschließend ist zu sagen, dass die vorgestellten Herausforderungen nicht ausschließlich intern durch die Automobilindustrie gelöst werden sollten. Auch wenn Testkonzepte für das autonome Fahren optimiert werden, wird es die 100-prozentige Sicherheit nicht geben. Die „Vision Zero“ bleibt besonders im Mischbetrieb mit zusätzlichen Verkehrsteilnehmern zunächst eine Vision. Spätestens mit dem ersten Unfall, den ein autonomes Fahrzeug verursacht, wird die zuvor erteilte Freigabe auf den Prüfstand gestellt. Dementsprechend sollte die Grundlage für die Freigabe durch die Beteiligten öffentlich diskutiert und transparent gestaltet werden.

Literatur

1. Felkai, R., Beiderwieden, A.: Schaffen allgemeiner Voraussetzungen der Projektabwicklung. In: Projektmanagement für technische Projekte, pp. 7–49. Springer Fachmedien Wiesbaden (2013)
2. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2007/46/EG (2007)
3. Reuter, A.: Produkthaftung in Deutschland. In: Werdich, M. (ed.) FMEA – Einführung und Moderation, pp. 121–137. Vieweg+Teubner Verlag (2012)
4. Gasser, T.M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen – Fahrzeugtechnik (F), vol. 83. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, Bremerhaven (2012)
5. Ward, R.B.: Revisiting Heinrich's law. In: Chemeca. Quality of life through chemical engineering (2012)
6. Hydén, C.: The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique, Lund Institute of Technology. Department of Traffic Planning and Engineering (1987)
7. Donner, E., Winkle, T., Walz, R., Schwarz, J.: RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen. In: VDA Technischer Kongress 2007, pp. 231–241, Sindelfingen (2007)

8. Spanfelner, B., Richter, D., Ebel, S., Wilhelm, U., Branz, W., Patz, C.: Herausforderungen in der Anwendung der ISO26262 für Fahrerassistenzsysteme. Challenges in applying the ISO 26262 for driver assistance systems. In: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München (ed.) 5. Tagung Fahrerassistenz, München (2012)
9. Weitzel, A., Winner, H., Peng, C., Geyer, S., Lotz, F., Sefati, M.: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Fahrzeugtechnik (F), vol. 98. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, Bremerhaven (2014)
10. Schuld, F., Saust, F., Lichte, B., Maurer, M., Scholz, S.: Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen. In: AAET 2013
11. Horstmann, M.: Verflechtung von Test und Entwurf für eine verlässliche Entwicklung eingebetteter Systeme im Automobilbereich, TU Braunschweig (2005)
12. Daimler AG: Mercedes-Benz präsentiert in Genf Limousine und Coupé der neuen E-Klasse (2009)
13. Fach, M., Baumann, F., Breuer, J., May, A.: Bewertung der Beherrschbarkeit von Aktiven Sicherheits- und Fahrerassistenzsystemen an den Funktionsgrenzen. In: 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit, 6./7. Oktober 2010 in Wolfsburg (2010)
14. Burgdorf, F.: Eine kunden- und lebenszyklusorientierte Produktfamilienabsicherung für die Automobilindustrie, KIT Scientific Publishing; Karlsruher Institut für Technologie (2010)
15. Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): Regelung Nr. 13-H – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen (2010)
16. Baake, U., Wüst, K., Maurer, M., Lutz, A.: Testing and simulation-based validation of ESP systems for vans. *ATZ Worldw* 116(2), 30–35 (2014). doi: 10.1007/s38311-014-0021-6
17. Rasmussen, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics SMC-13*(3), 257–266 (1983)
18. Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, Hakuli, Wolf (eds.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pp. 15–23 (2011)
19. Ständer, T.: Eine modellbasierte Methode zur Objektivierung der Risikoanalyse nach ISO 26262, TU Braunschweig (2011)
20. Bahr, M., Sturzbecher, D.: Bewertungsgrundlagen zur Beurteilung der Fahrbefähigung bei der praktischen Fahrerlaubnisprüfung. In: Winner, H., Bruder, R. (eds.) 6. Darmstädter Kolloquium Mensch+Fahrzeug: Maßstäbe des sicheren Fahrens. *Ergonomia* (2013)
21. Statistisches Bundesamt (Destatis): Verkehrsunfälle – Fachserie 8 Reihe 7 (2012)
22. Winner, H.: Quo vadis, FAS? In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C. (eds.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 3rd edn. Vieweg-Teubner-Verlag (2015)
23. Glauner, P., Blumenstock, A., Haueis, M.: Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen. In: UNI DAS e.V (ed.) 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme, pp. 5–14, Walting (2012)
24. Eckstein, L., Zlocki, A.: Safety Potential of ADAS – Combined Methods for an Effective Evaluation. *ESV* (2013)
25. Tatar, M., Mauss, J.: Systematic Test and Validation of Complex Embedded Systems. *ERTS-2014*, Toulouse, 5–7 (2014)
26. Mitsch, S., Ghorbal, K., Platzer, A.: On Provably Safe Obstacle Avoidance for Autonomous Robotic Ground Vehicles. *Robotics Science and Systems (RSS)*, 2013. Accessed 27 June 2014
27. Bock, T.: Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (eds.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pp. 76–83. Vieweg+Teubner Verlag (2012)
28. Hendriks, F., Tideman, M., Pelders, R., Bours, R., Liu, X. (eds.): Development tools for active safety systems: Prescan and VeHIL. *Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, 2010 IEEE International Conference on (2010)

Walther Wachenfeld, Hermann Winner

Inhaltsverzeichnis

22.1 Einleitung 466

22.2 Fahrzeug, Umwelt und lernender Fahrer 466

22.3 Lernende technische Systeme 468

 22.3.1 Verschiedene Verfahren des Maschinellen Lernens 469

 22.3.2 Beispiele 471

22.4 Die Automation, die den lernenden Fahrer ersetzt 472

 22.4.1 Sicherheitsrelevante Systeme 473

 22.4.2 Herausforderungen und Lösungsansätze in den verschiedenen Phasen
 des Systemlebenszyklus 474

 22.4.3 Maße sicheren Fahrens 479

22.5 Die Automation als Teil eines lernenden Kollektivs 483

22.6 Fazit 484

Literatur 486

W. Wachenfeld (✉)
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
wachenfeld@fzd.tu-darmstadt.de

H. Winner
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
winner@fzd.tu-darmstadt.de

22.1 Einleitung

Mit dem autonomen Fahren wird ein technisches System den Menschen als Fahrer des Automobils ersetzen. Aktuell arbeiten die Automobilindustrie, Universitäten, aber auch große IT-Unternehmen an der Implementierung von Funktionen, die dem technischen System erlauben, die Fahrzeugführung umzusetzen. Dabei stehen die Aufgaben der Perception, Kognition, Verhaltensentscheidung und die Verhaltensausführung, die auch der Mensch vollbringt, im Fokus. Zusätzlich besitzt der Mensch weitere Fähigkeiten, die nicht direkt mit dem Führen eines Fahrzeugs in Verbindung stehen. Beispielsweise verändert das Lernen des Menschen direkt die Leistungsfähigkeit, mit der er Aufgaben bewältigt. Diese Fähigkeit des Menschen im System Fahrer – Fahrzeug – Umwelt eröffnet die Frage, ob für das Ersetzen des Menschen das technische System ebenfalls Lernfunktionen aufweisen wird. In den verschiedensten Bereichen, getrieben vor allem durch die Informatik, existieren lernende und gelernte Systeme unterschiedlichster Form, die es mit herkömmlichen analytischen Systemen und deren Leistungsfähigkeit aufnehmen können. Das Besondere der Fahrzeugautomatisierung ist jedoch zum einen deren Sicherheitsrelevanz, zum anderen unterscheidet sich das Produkt Automobil zusätzlich durch seine Systemlebenszyklen von anderen Gütern aus der IT-Industrie. Diese beiden Besonderheiten mit ihren Herausforderungen und Lösungsansätzen werden diskutiert. Zusätzlich wird auf kollektives Lernen im Zusammenhang des autonomen Fahrens eingegangen, denn besonders der direkte Austausch bzw. die Kopie von Gelerntem stellt einen der Vorteile des maschinellen Lernens gegenüber dem menschlichen Lernprozess dar.

Das Nachbilden des menschlichen Lernens durch Maschinelles Lernen beschäftigt eine ganze Forschergemeinde, denn sowohl über die Prozesse des menschlichen Lernens als auch für Methoden des Maschinellen Lernens wird daraus ein weiterführendes Verständnis als Ergebnis erwartet. Mit dem Bewusstsein über den aktuell vorhandenen Unterschied zwischen beiden Formen des Lernens wird in diesem Kapitel Maschinelles Lernen als Algorithmus verstanden, der durch einen Menschen erzeugt wird. Die Ausführung der Software folgt diesen Algorithmen wie jede andere Software auch. Ziel dieses Beitrags ist es nicht, den lernenden Menschen mit einem lernenden Fahrroboter zu vergleichen. Vielmehr wird diskutiert, warum, ob und mit welchen Herausforderungen und Lösungsansätzen Maschinelles Lernen in seiner aktuellen Form im autonomen Fahrzeug denkbar ist. Dabei stellt dieses Kapitel im Besonderen die Sicht der Fahrzeugtechnik auf diese Frage dar und basiert für den Bereich des Maschinellen Lernens auf Erfahrungen aus der Literatur.

22.2 Fahrzeug, Umwelt und lernender Fahrer

Führt der Fahrer ein Fahrzeug in einer beliebigen Umwelt, handelt es sich dabei um eine zielgerichtete Tätigkeit. Nach Rasmussen [1, 2] zeigt der Mensch dabei ein Verhalten, das sich in drei Bereiche aufteilen lässt. Er handelt fertigungs-, regel- und wissensbasiert (s. Abb. 21.6 in Kap. 21). Fertigungs-basiertes Verhalten wird von Rasmussen [1] als Reiz-

Reaktions-Automatismus beschrieben, den der Mensch in alltäglichen Routinesituationen ohne intensive Inanspruchnahme von kognitiven Fähigkeiten bewältigt.

Kognitiv anspruchsvoller gestaltet sich das regelbasierte Verhalten. Zusätzlich zur Wahrnehmung und zur motorischen Aktion ist für das regelbasierte Verhalten eine assoziative Zuordnung notwendig. Hierbei ordnet der Mensch die erkannte Situation einer ihm bekannten Regel zu und wählt basierend darauf aus einem Repertoire an Verhaltensregeln. Diese Regeln hat der Mensch zielgerichtet gelernt oder sich von vergangenen Situationen und Handlungen gemerkt („gespeichert“). In diesem Zusammenhang besitzt der Mensch die Fähigkeit, ähnliche Situationen zu identifizieren und somit gelernte Regeln auf ähnliche Situationen zu übertragen.

Treten Situationen auf, die für den Menschen neu sind und für die keine trainierten Handlungen vorliegen, agiert der Mensch wissensbasiert. Dazu versucht der Mensch, basierend auf seinem trainierten Wissen, die Handlungsalternativen, die zur Auswahl stehen, zu generieren und zu bewerten. Die subjektiv optimale Alternative wird ausgewählt und ausgeführt.

Rasmussens [1] Verständnis von zielgerichtetem Handeln macht deutlich, was mit dem lernenden Fahrer gemeint ist. Zu Beginn der Fahrer-„Karriere“ wird in der Theorieausbildung der Fahrschule das Grundlagenwissen über den Straßenverkehr aufgebaut und abgeprüft. Dabei setzt dieses Wissen auf dem bereits erworbenen Wissen durch das Leben in der Gesellschaft auf. Zusätzlich wird regelbasiertes Verhalten durch Theorie- und Praxisunterricht trainiert. Mit abgelegter Führerscheinprüfung darf der Mensch nun ohne weitere Unterstützung am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen (Ausnahme: begleitendes Fahren beim Führerschein mit 17). Jedoch hat der Mensch zu diesem Zeitpunkt weder alle Regeln erlernt noch das Wissen erarbeitet, das für das zukünftige Leben im öffentlichen Straßenverkehr benötigt wird. Mit jeder Erfahrung, die Menschen sammeln, verschiebt sich das Verhalten von wissensbasiert zu regelbasiert und von regelbasiert zu fertigkeitsbasiert. Das Training ermöglicht somit eine Effizienzsteigerung des menschlichen Verhaltens [1].

Zieht man Zahlen für verunglückte Pkw-Fahrer pro einer Million Kilometer Verkehrsleistung heran, dann sinkt nach Oswald und Williams [3, 4] das Risiko mit dem fortschreitenden menschlichen Alter, bis es ab 40–50 wieder zu steigen beginnt. Nach Burgard [5] sind dafür neben charakterlichen Kompetenzen (Persönlichkeit) sowie psychischen und physischen Voraussetzungen auch die Erfahrungen verantwortlich, die aus dem Alter folgen. Wird das Verarbeiten der Erfahrungen als Lernprozess gesehen, trägt die Fähigkeit des Lernens zu einer Verbesserung der Fahrkompetenz bei [6].

Würde der Straßenverkehr klaren Regeln folgen, die dem Menschen bekannt sind, so müsste er das oben beschriebene Verhalten nicht zeigen. Es handelt sich beim Straßenverkehr jedoch um ein offenes System, bestehend aus statischen und dynamischen Objekten sowie einer Vielzahl von Umfeldeinflüssen, wie beispielsweise Helligkeit oder Niederschlag. Wenn auch in geringerem Umfang, verglichen mit Fahranfänger/innen, treten dadurch für erfahrene Teilnehmer des Straßenverkehrs weiterhin unbekannte Situationen auf, die es zu bewältigen gilt. Weil der Mensch eben dieses wissens-, regel- und fertigkeits-

basierte Verhalten zeigt, ist der aktuelle Straßenverkehr mit der vorhandenen Effizienz, Genauigkeit und Sicherheit möglich.

Zusätzlich führt dieses Verhalten zu einem individuellen Fahrverhalten. In ein und derselben Situation handeln Fahrer unterschiedlich und haben verschiedene Vorlieben für die Wahl des Abstands, der Geschwindigkeit und der Beschleunigungen.

Eben diese Fähigkeiten, die das fertigungs-, regel- und wissensbasierte Verhalten ermöglichen, werden mit der Automatisierung aus der Fahrzeugführung genommen und durch entsprechende Fähigkeiten des Fahrroboters ersetzt.

22.3 Lernende technische Systeme

Der Begriff des Maschinellen Lernens steht für ein Forschungsgebiet, das sich mit Methoden für die Erstellung von Algorithmen beschäftigt. Eine besondere Eigenschaft dieser Algorithmen ist die automatische, auf Erfahrungen basierende Verbesserung des technischen Systems. Die automatische Verbesserung folgt dabei den Regeln und Maßen, die der menschliche Entwickler zuvor definiert hat. Kontrovers diskutierte Vorstellungen von vollkommen frei und kreativ handelnden Maschinen, wenn es diese überhaupt geben wird, sind nicht im Fokus dieser Betrachtung. Für den Einsatz des Maschinellen Lernens wird eine klar definierte Aufgabe benötigt, für die eine Bewertungsmetrik sowie (Trainings-)Daten zur Verfügung stehen.

Ein oft verwendetes Zitat für die Definition von Maschinellern Lernen stammt von Mitchell:

A computer program is said to learn from experience E with respect to some class of tasks T and performance measure P , if its performance at tasks in T , as measured by P , improves with experience E . [7]

Nach Mitchell [7] hat sich Maschinelles Lernen im Einsatz besonders dann bewährt, wenn

1. eine große Anzahl von Daten in einer Datenbank existiert und diese möglicherweise implizit Informationen enthält, die automatisiert extrahiert werden können,
2. Menschen über einen gewissen Bereich nur ein schlechtes Verständnis besitzen und somit das Wissen für effektive Algorithmen fehlt oder
3. Aufgaben eine dynamische Anpassung an sich ändernde Umgebungsbedingungen erfordern.

Wie diese Definition und die Einsatzbereiche zum autonomen Fahren passen, wird in Abschn. 22.4 diskutiert. Zunächst wird jedoch ein Einblick in Verfahren des Maschinellen Lernens gegeben. Mithilfe von Beispielen aus verschiedenen Bereichen wird die Breite der Einsatzmöglichkeiten demonstriert, bevor auf das autonome Fahren als besondere Aufgabe eingegangen wird.

22.3.1 Verschiedene Verfahren des Maschinellen Lernens

Breiman stellte 2001 Folgendes fest:

In the past fifteen years, the growth in algorithmic modeling applications and methodology has been rapid. It has occurred largely outside statistics in a new community – often called machine learning. [8]

In [9] werden die ersten Arbeiten des Maschinellen Lernens u. a. auf McCulloch und Pitts im Jahr 1948 zurückgeführt, sodass die Vielzahl der vorhandenen Lernverfahren eine detaillierte Beschreibung aller Verfahren nicht ermöglicht. Deshalb werden nachfolgend Kategorien von Lernproblemen, nach denen die Verfahren zumeist eingeteilt werden [10, 11, 12], beschrieben.

Supervised Learning

Supervised Learning, überwachtes Lernen oder Lernen mit Lehrer zeichnet sich durch bereits bewertete Trainingsdaten (labeled data) aus. Die Trainingsdaten, also die Erfahrungen, auf denen das Maschinelle Lernen aufbaut, enthalten Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Lernproblems. Beispielsweise würden bei der Klassifikation, ob bei einem Unfall Airbags auslösen oder nicht, Trainingsdaten auf der einen Seite aus Beschleunigungswerten und auf der anderen Seite aus zugehörigen Bewertungen (auslösen oder nicht auslösen) bestehen. Diese Bewertungen müssen dabei beispielsweise durch einen Experten/Lehrer oder eine Beobachtung über der Zeit erstellt werden. Das Lernverfahren nutzt nun diese Erfahrungswerte, um für neu beobachtete Eingangswerte die Ausgangsgröße zu bestimmen. Für das Übertragen von Erfahrungswerten auf neue Eingangswerte wird nach [10] zwischen dem *faulen* (lazy- bzw. memory-based learning) und dem *eifrigen* Lernen (eager bzw. model-based learning) unterschieden.

Beim faulen Lernen werden die Trainingsdaten während des Lernens abgespeichert und ein Ähnlichkeitsmaß definiert. Dieses Ähnlichkeitsmaß kann unterschiedlich komplex sein und reicht vom einfachen euklidischen Abstand bis zu komplexen Abständen beim Case-Based-Reasoning. Wenn der Ausgangswert für neue Eingangswerte gesucht wird, werden die dem neuen Fall ähnlichsten Trainingsdaten bestimmt und daraus der Ausgangswert abgeleitet. Dieses Vorgehen entspricht dem transduktiven Schlussfolgern [13]. Im Gegensatz dazu wird beim eifrigen Lernen, basierend auf den Trainingsdaten, während der Trainingsphase ein globales Modell erstellt (Induktion). Ausgangswerte für neue Fälle werden per Deduktion aus dem Modell geschlossen.

Unsupervised Learning

Für das Unsupervised Learning, unüberwachtes Lernen oder Lernen ohne Lehrer stehen ebenfalls Trainingsdaten zur Verfügung, jedoch in diesem Fall ohne Bewertung bzw. Ausgangsgröße (unlabeled data). Bei diesem Lernverfahren ist das Ziel, eine Struktur in den Daten zu finden bzw. diese anhand der Struktur zu klassifizieren. Die Trainingsdaten wer-

den dabei genutzt, um diese Strukturen aufzudecken und neu beobachtete Eingangswerte basierend darauf einzuteilen.

Reinforcement Learning

Das Reinforcement Learning oder Lernen durch Verstärkung unterscheidet sich von beiden vorherigen Verfahren, denn zu Beginn liegen keine oder wenige Trainingsdaten vor. Die für eine angestrebte Verbesserung benötigten Trainingsdaten erzeugt ein Agent¹ selbst, indem nach einem festgelegten Schema die zu optimierende Aufgabe ausgeführt wird. Eine Bewertung der Ausführung der Aufgabe fließt in den Lernprozess zurück und bildet so einen Trainingsdatensatz aus Ein- und Ausgangsgrößen, die für weitere Optimierungsschritte genutzt werden. Die Ansätze des Reinforcement Learnings sind dem sogenannten Innovationsdilemma ausgesetzt, denn „Exploration“ und „Exploitation“ widersprechen einander, was March folgendermaßen beschreibt:

Exploration includes things captured by terms such as search, variation, risk taking, experimentation, play, flexibility, discovery, innovation. Exploitation includes such things as refinement, choice, production, efficiency, selection, implementation, execution. [15]

Dem Lernproblem entsprechend ist ein Gleichgewicht für beides zu finden, denn auf der einen Seite ist in einem teils unbekannten Suchraum eine optimale Ausführung der Aufgabe gesucht und auf der anderen Seite wird diese Suche durch Rahmenbedingungen wie Kosten, Sicherheit und Zeit begrenzt.

Neben der Frage, ob und in welcher Form die Trainingsdaten vorhanden sind, kann das Lernproblem auch anhand des Einsatzes der Trainingsdaten unterschieden werden.

Batch Learning

Beim Batch oder Offline Learning wird zu einem Zeitpunkt ein Satz von Trainingsdaten verwendet, um die Lernmethode anzuwenden. Erstellt die Lernmethode beispielsweise ein Modell, wird dieses Modell durch weitere Erfahrungen, die während des Einsatzes gesammelt werden, nicht aktualisiert.

Online Learning

Das Online Learning zeichnet sich durch einen iterativen Prozess aus, bei dem neue Erfahrungen in den Lernprozess mit einfließen. Das Ziel ist, die Bewältigung der Aufgabe kontinuierlich zu optimieren und dabei Erfahrungen aus dem Einsatz zu berücksichtigen. Das hat ein Systemverhalten zur Folge, das sich über den Erfahrungen ändert. Da die Erfahrungen in einer zeitlichen Abfolge gesammelt werden, ändert sich das Systemverhalten demzufolge auch über der Zeit.

¹ Russell definiert: “An agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting upon that environment through effectors.” [14]

Diese unterschiedlichen Arten von Lernproblemen erfordern den Einsatz verschiedener Methoden des Maschinellen Lernens [12]. Diese reichen von Entscheidungsbäumen, künstlichen Neuronalen Netzen und Genetischen Algorithmen über Stützvektorenmethode, Instanzenbasiertes Lernen, Hidden-Markov-Modelle, Wert-Iteration bis hin zum Q-Lernen usw. Diesen Methoden ist gemein, dass die Güte, mit der ein Lernproblem bearbeitet wird, von drei grundlegenden Eigenschaften abhängt. Zum einen wird die Repräsentativität der Trainingsdaten gefordert, denn nur wenn auch für den Betrieb relevante Daten (Erfahrungen) in ausreichender Anzahl für das Lernen eingesetzt werden, sind die Methoden in der Lage, das Lernproblem optimal zu lösen. Zum anderen gilt Gleiches für die Qualität der Trainingsdaten, sodass gerade für real gemessene Größen die Behandlung von verrauschten, fehler- oder lückenhaften Daten notwendig ist. Neben den Testdaten stellt die Bewertung der Performanz (P) eine weitere Herausforderung dar. Nur wenn die Bewertung für den gesamten Einsatzbereich mit realen Daten valide ist, wird auch die Methode das Lernproblem korrekt bearbeiten.

22.3.2 Beispiele

Folgende Beispiele dienen als kleine Stichprobe für Bereiche, die mit Verfahren des Maschinellen Lernens adressiert werden können.

Airbagauslösung [16, 17]

Das Lernproblem besteht aus der Zuordnung von Sensorwerten zu dem Befehl der Auslösung eines Fahrzeugairbags. Dafür wird ein Klassifikator gelernt, der Unfälle entweder der Klasse „auslösen“ oder „nicht auslösen“ zuordnet. In diesem Beispiel hat der Datensatz eines Unfalls 30 Dimensionen und besteht beispielsweise aus Beschleunigungs-, Druck- oder Körperschallsensoren an verschiedenen Punkten im Fahrzeug. Für 40 Trainingsdatensätze, bei denen die Sensorwerte für repräsentative Unfälle aufgezeichnet werden, wird zusätzlich bewertet (gelabelt), ob eine Auslösung der Airbags notwendig wäre oder nicht.

Fahrtrajektoriensteuerung mit KNN [18]

Das Projekt ALVINN (autonomous land vehicle in a neural network) hatte das Ziel, ein Fahrzeug auf der optimalen Fahrtrajektorie innerhalb seines Fahrstreifens zu positionieren. Die Trainingsdaten bestehen aus den Eingangsgrößen, den einzelnen Pixeln eines Kamerabildes und der zugehörigen Ausgangsgröße, dem Lenkwinkel. Aufgezeichnet werden diese während der Fahrt eines menschlichen Fahrers. Gelernt wird ein Künstliches-Neuronales-Netz, an dessen 960 Eingangsknoten die einzelnen Werte der 30 x 32-Pixel des Kamerabildes übergeben werden. Diese Eingangsknoten sind über vier versteckte Knoten mit den 30 Ausgabeknoten verbunden, die jeweils für eine eigene Krümmung stehen.

22.4 Die Automation, die den lernenden Fahrer ersetzt

Für die Automobilindustrie ist Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz nicht nur bei der Automatisierung der Fahrzeugführung von Interesse, sondern auch in anderen Bereichen wie dem Design, der Produktion oder dem After-Sales-Management [19]. Diese Bereiche werden jedoch für die Betrachtung ausgeschlossen, genauso wie der Bereich des Infotainments. Im Fokus steht die Fahrzeugautomatisierung, die nach heutigem Verständnis aus folgenden Komponenten besteht, um ein Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr zu bewegen:

1. Perzeption von Umfeld- und Fahrzeugzustandsgrößen,
2. Kognition dieser Größen zu einer Weltrepräsentation,
3. Verhaltensentscheidung basierend auf der Weltrepräsentation und
4. Verhaltensausführung.

Diese Komponenten liefern die Eigenschaften, die nach Mitchell (s. Abschn. 22.3) bereits zu einem erfolgreichen Einsatz von Maschinellern geführt haben. Die zunehmende Perzeption von Umfeld- sowie Fahrzeugzustandsgrößen liefert eine Vielzahl maschinenlesbarer Informationen. Denn zum einen nimmt die Leistungsfähigkeit der Sensoren und der Signalverarbeitung weiter zu, sodass ein detaillierteres Bild der Welt für die maschinelle Verarbeitung zur Verfügung steht. Zum anderen steigt die Anzahl an Sensoren und damit ausgestatteter Fahrzeuge auf der Roadmap zur Vollautomatisierung. Daraus folgt, dass die Qualität und Quantität an Trainingsdaten für Maschinelles Lernen zunimmt. Die zweite Eigenschaft gilt besonders für manche Bereiche der Kognition und Verhaltensentscheidung, denn für die menschlichen Prozesse, die es zu ersetzen gilt (s. Abschn. 22.2), existieren vorwiegend Theorien. Anhand des von der EU geförderten Human Brain Projects und den damit einhergehenden Forschungsarbeiten ist ersichtlich, dass noch eine Vielzahl von ungelösten Fragestellungen existiert und somit das Wissen für effektive Algorithmen fehlt. Die dritte Eigenschaft liefert der Straßenverkehr. Wie schon in Abschn. 22.2 beschrieben, erfordert die Welt, in der sich das Fahrzeug bewegt, die Anpassung an sich ändernde Umgebungsbedingungen, weshalb eine Implementation von Maschinellern in der Automation, die sich diesen Änderungen anpassen kann, naheliegt.

Neben diesen drei Motivatoren für den Einsatz des Maschinellen Lernens existieren jedoch auch besondere Herausforderungen, die dem Einsatz entgegenstehen. Das Besondere der für autonomes Fahren notwendigen vier Komponenten (Perzeption, Kognition, Verhaltensentscheidung, Verhaltensausführung) gegenüber anderen Anwendungen des Maschinellen Lernens ist der Eingriff in das reale Verhalten des Fahrzeugs, sodass, unabhängig, an welcher Stelle dieser Kette ein unerwünschtes Verhalten auftritt, sich dieses zu einem Ausfall und einem Unfall weiterentwickeln kann. Um den Einsatz von Verfahren des Maschinellen Lernens in der Fahrzeugautomatisierung zu diskutieren, erfolgt deshalb zunächst die Klassifizierung sicherheitsrelevanter Systeme sowie die Zuordnung der Fahrzeugautomatisierung zu einer dieser Klassen.

22.4.1 Sicherheitsrelevante Systeme

Nach DIN 31000 gilt:

Sicherheit ist eine Sachlage, bei der das Risiko nicht größer als das Grenzkrisiko ist. [20]

Inwieweit ein System im Automobil (oder auch generell) diese Sicherheit beeinflusst, kann folgendermaßen eingeteilt werden ([16] erweitert):

1. Sicherheitsunkritisch

Fehler in diesem System führen zu keiner Gefährdung von Personen oder der Umwelt. Eine fehlerhafte Spracherkennung, die oft mit Verfahren des Maschinellen Lernens umgesetzt wird [21], ist beispielsweise sicherheitsunkritisch, wenn diese im Infotainment genutzt wird. Deshalb sind solche Systeme bereits im Einsatz, obwohl zum Teil regelmäßig Fehler auftreten, ohne dass die Sicherheit negativ beeinflusst wird.

2. Sicherheitsrelevant

Ein System wird als sicherheitsrelevant bezeichnet, wenn durch Fehler dieses Systems eine Gefährdung von Personen oder der Umwelt eintreten kann.

c. System zur Entscheidungsunterstützung

Hier können die Vorschläge des Systems durch den Entscheider ausgeführt werden oder eben nicht. Ein Anästhesist bekommt beispielsweise einen Vorschlag für die Medikamentenvergabe, basierend auf Informationen über den Patienten, die Operation und vergangene Erfahrungswerte. Ein Fehler des Systems würde den Patienten gefährden, jedoch nur dann, wenn der Anästhesist dem Vorschlag folgt [22].

d. System zur Überwachung und Diagnose

Ein Fehler des Systems führt zum Ausbleiben einer Warnung und kann, wenn der Fehler nicht anderweitig erkannt wird, zu einer Gefahr für Personen und Umwelt werden. Versagt das Diagnosesystem einer Industriemaschine beim Auftreten fehlerhaften Verhaltens, so kann ein Ausfall dieser Diagnose zu einer Gefahr werden [23].

3. Sicherheitskritisch

Systeme, die bei einem Fehler direkt zu einer Gefährdung von Personen oder der Umwelt führen, werden als sicherheitskritisch bezeichnet.

a. Automation überwacht/korrigierbar

Wird eine Aktion ohne zusätzliche Bestätigung automatisiert ausgeführt, so führt der Fehler eines automatisierten Systems direkt zu einer Gefährdung von Personen und Umwelt. Wird das System zusätzlich durch einen Menschen überwacht und ist die Möglichkeit zur Korrektur gewährleistet, kann die Gefahr abgewandt werden. Der/die Überwacher/in bringt das System wieder unter Kontrolle, sodass Fehlertoleranz durch den Menschen hergestellt wird. Dabei ist zu beachten, dass besonders mit zunehmender Automatisierung der Prozesse und erweiterter Entlastung des Menschen dessen Fähigkeiten abnehmen, einen automatisierten Prozess zu überwachen [24]. Der sogenannte Stauassistent als Teilautomatisierung der Fahrzeugführung bildet ein solches

sicherheitskritisches System, denn ein fehlerhaftes Systemverhalten birgt direkt eine Gefahr. Diese Gefahr wird jedoch mit der Überwachung durch den Fahrer adressiert, denn der Stauassistent ist so entwickelt, dass der Mensch fehlerhaftes Systemverhalten durch sein Eingreifen kontrolliert.

b. Automation nicht überwacht/ohne Korrekturmöglichkeit

Sicherheitstechnisch am kritischsten ist eine Automation ohne Korrekturmöglichkeit. Ein Fehler des Systems führt ohne Überwachung direkt zu einer Gefährdung und abhängig von der Situation zu einem Schaden von Personen und Umwelt. In diese Kategorie ist das vollautomatisierte Fahren einzuordnen, denn nach Definition muss der Insasse des Fahrzeugs dieses nicht mehr überwachen. Somit führt ein durch das System nicht adressierter Fehler oder ein unerwünschtes Verhalten direkt zu Gefahr und eventuellem Schaden von Personen und Umwelt.

Diese Kategorisierung und die Einordnung der autonomen Fahrt in die Kategorie *nicht überwachte Automation* zeigt, warum aktuell vorhandene Verfahren des Maschinellen Lernens aus sicherheitsunkritischen bzw. sicherheitsrelevanten Bereichen nicht einfach direkt übernommen werden können. Nicht ohne Grund sind die Berichte über sicherheitskritische Beispiele aus Abschn. 22.3.2 ohne Verweis auf einen nicht überwachten Einsatz.

Der Einsatz von Verfahren des Maschinellen Lernens in einer Automation, die nicht überwacht oder ohne Korrekturmöglichkeit ist, bedarf einer weiteren Einordnung, denn abhängig vom Zeitpunkt im Systemlebenszyklus eines Fahrzeugs leiten sich unterschiedliche Herausforderungen ab.

22.4.2 Herausforderungen und Lösungsansätze in den verschiedenen Phasen des Systemlebenszyklus

Der Fahrzeuglebenszyklus wird in diesem Bericht in die fünf Phasen Forschung, Entwicklung, Betrieb, Service sowie Nutzerwechsel/Stilllegung aufgeteilt, denn in jeder Phase warten auf den Einsatz des Maschinellen Lernens unterschiedliche Herausforderungen.

22.4.2.1 Forschung

Wird Maschinelles Lernen in der Forschung eingesetzt, geht es zumeist darum, die Machbarkeit von Verfahren zu zeigen. Die Bandbreite der Beispiele reicht von Online, Offline, Supervised, Unsupervised bis hin zu Reinforcement Learning. Als Datenbasis werden beispielhafte Trainingsdatensätze herangezogen. Gleiches gilt für die Bewertung der Leistungsfähigkeit und Robustheit der Verfahren. Diese wird innerhalb von kontrollierten und/oder überwachten Bedingungen basierend auf beispielhaften Testdaten bzw. Testfahrten durchgeführt. Besonders kontrollierte Bedingungen und/oder der Einsatz ausgebildeter Testfahrer (Kategorie 3.a, s. Abschn. 22.4.1) machen Fehler tolerierbar, sodass eine Vielzahl von umgesetzten Beispielen existiert. Dementsprechend gehört zur Herausforderung für den Einsatz maschineller Lernverfahren nicht der Nachweis der Sicherheit. Die Her-

ausforderung für den Einsatz von Maschinellern im Forschungsbereich des automatisierten Fahrens besteht im Zugang zu repräsentativen Daten für den späteren Einsatzbereich. Folglich stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf die Systemlebenszyklen Entwicklung und Betrieb.

22.4.2.2 Entwicklung

Das Lernen während der Entwicklungsphase kann mit dem Offline-Lernen verglichen werden. Möglichst anwendungsrelevante Trainingsdaten werden gezielt gesammelt, um während der Entwicklung beispielsweise ein Modell zu lernen. Die Erfüllung der Anforderungen an die Sicherheit der Ergebnisse wird, wie bei allen anderen sicherheitsrelevanten Komponenten des Fahrzeugs auch, verifiziert und validiert, sodass die Freigabe des Fahrzeugs für die Produktion und den Einsatz erteilt werden kann. Danach verändern sich das gelernte Modell oder die Klassifizierung nicht weiter. Das Lernverfahren arbeitet nicht online bzw. nicht adaptiv, nutzt somit weitere Daten, die im Betrieb erfahren werden, nicht als Trainingsdaten, um das Modell oder die Klassifizierung zu aktualisieren. Es handelt sich somit während des Einsatzes um ein zeitinvariantes System, wodurch die bekannten Methoden für Verifikation und Validierung gültig bleiben. Allerdings ist zu beachten, dass die Ergebnisse der verschiedenen maschinellen Lernverfahren unterschiedlich gut interpretierbar sind. Beispielsweise sind gelernte Entscheidungsbäume mit begrenztem Umfang oder ein überschaubarer Satz an gelernten Regeln sehr gut interpretierbar [25] und ermöglichen somit den Einsatz von White-Box-Testverfahren [26]. Andere Verfahren wie z. B. die Random-Forest-Verfahren oder subsymbolische Neuronale Netzwerke hingegen sind für einen Tester schwer interpretierbar und stellen somit eine Black-Box dar. Für solche komplexen Komponenten bedeutet der Nachweis der Sicherheit eine größere Herausforderung, verglichen mit analytischen Modellen. Da sich, wie auch für die meisten analytischen Modelle, für Systeme mit hoher Eingangsdimensionalität das Brute-Force-Testen² nicht eignet [27], werden Otte [25] folgend und erweiternd vier Gegenmaßnahmen in Betracht gezogen:

1. Herunterbrechen eines vieldimensionalen Problems auf niedrigdimensionale Teilmodelle, damit die Teilmodelle von Experten unabhängig interpretiert und validiert werden können,
2. Einsatz von Vergleichslösungen, die eine Bewertung der Sicherheit der gelernten Komponente ermöglichen,
3. Begrenzen der Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen auf bestimmte Wertebereiche, wie z. B. die der Trainingsdaten. Diese Begrenzungen können statisch sein, aber auch von anderen Größen abhängen, und
4. Begrenzen der Dynamik von Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen auf minimale, maximale, positive oder negative Änderung pro Zeit.

² Der Brute-Force-Ansatz steht für das Ausprobieren (Testen) aller möglichen Kombinationen der das Testobjektverhalten beeinflussenden Parameter.

Jede dieser Maßnahmen beschränkt das Potenzial des Maschinellen Lernens, um den Test des gelernten Systems zu ermöglichen.

22.4.2.3 Betrieb

Befindet sich das fertig entwickelte und produzierte Fahrzeug im Betrieb, fallen Daten über den realen Einsatzbereich an, und zwar über die statische Umwelt, andere Verkehrsteilnehmer und ihr Verhalten sowie den Nutzer und die Insassen des Fahrzeugs. Zusätzlich besitzt das Fahrzeug Daten über sein maschinelles Verhalten über der Zeit. Diese direkt vorhandenen neuen Informationen, die zuvor nicht zugänglich waren, motivieren den Einsatz von Online-Lernverfahren und somit adaptiven Systemen. Damit wird das Fahrzeug zu einem zeit- bzw. erfahrungsvarianten System. Dieser weitere Freiheitsgrad eines sich ändernden und zusätzlich nicht überwachten Systems ergibt eine besondere Herausforderung für das Testen und die Absicherung, die schon für zeitinvariante, autonome Systeme bisher nicht gelöst wurde (s. Kap. 21). Grundsätzlich lassen sich zwei Möglichkeiten aufzeigen, wie ein System, das sich während des Betriebs verändert, abzusichern wäre. Entweder wird die Adaptivität auf einen klar begrenzten, einhüllenden Bereich eingeschränkt, wie etwa bei Adaptive Transmission Control-Strategien [28]. Dort sind Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsraum auf wenige Parameter begrenzt [29], sodass aus Autorensicht eine Verifikation und Validierung während der Entwicklungsphase möglich scheint. Widerspricht diese Begrenzung dem Einsatzzweck von Maschinellern Lernen während des Betriebs, ist eine Online-Überprüfung des sich ändernden, zeitvarianten und komplexen Systems notwendig [30]. Dafür wiederum bieten sich die zwei folgenden Ansätze an [30]:

1. Runtime Verification & Validation

Im Gegensatz zum klassischen Vorgehen der Verifikation und Validierung während des Entwicklungsprozesses durch den Entwickler wendet das System während des Betriebs Verifikations- und Validierungs-Methoden an [27, 30, 31]. Prinzipiell wird der Adaptionsprozess als Feedback-Loop gesehen. In Abb. 22.1 sind die vier Schritte Beobachten, Ana-

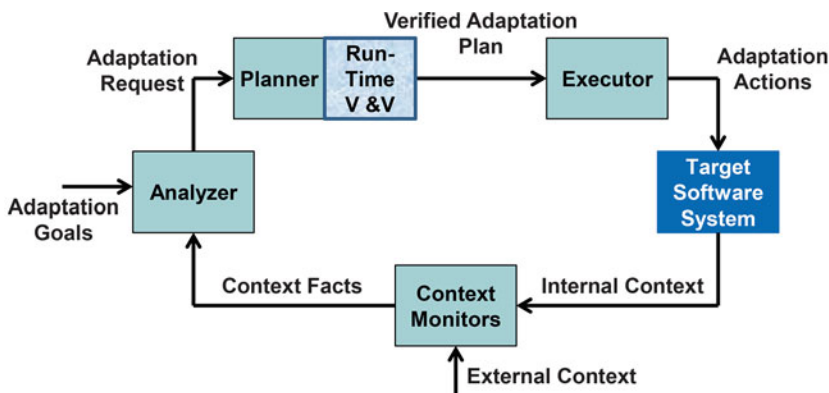


Abb. 22.1 Adaptionsprozess als Feedback-Loop mit Runtime Verification & Validation (nach [31])

lysieren, Planen und Ausführen dargestellt, die nach Tamura et. al. [31] für eine strukturierte Betrachtung des Adaptionsprozesses notwendig sind. Diese Darstellung lässt sich direkt auf Online-Lernverfahren übertragen. Wird in diesem Prozess eine Adaption des Systems ermittelt, ist diese mit Verfahren der Runtime Verification & Validation zu prüfen, bevor sie auf die ausführende Software angewandt wird. Dabei wird überprüft, ob durch die geplanten Änderungen das System den sicheren Bereich (*viability zone*) nicht verlässt. Konkret bedeutet dies für das autonome Fahren, dass vor Implementation der Änderung online zu überprüfen ist, ob die aktualisierte Fahrzeugführung die Anforderungen an Sicherheit erfüllt.

Die dabei eingesetzten Verfahren wie beispielsweise Modellprüfung (*model checking*) oder automatische Theorembeweiser (*theorem proving*) stoßen dabei, wie in Kap. 21 beschrieben, an ihre Grenzen. Auch der Einsatz von Software-in-the-Loop-Verfahren wäre denkbar, jedoch ist fraglich, ob ausreichend Rechenleistung für solche Verfahren in Serienfahrzeugen vorhanden ist.

2. Validierung und Verifikation durch Monitoring und Fehlertoleranz

Ist eine Überprüfung der Sicherheit des Systems vor Aktualisierung der Software nicht möglich, kann ein Fehler (*fault*) auftreten und zu einem Ausfall (*failure*) führen und somit zu einer Gefahr werden. Um dies zu verhindern, ist das System fehlertolerant auszulegen. Ein solches fehlertolerantes System bedarf grundsätzlich zweier Komponenten [32]: zum einen einer Überwachung (*monitoring*) der Zustände und des Verhaltens des Systems, um basierend auf einer Bewertung zu entscheiden, ob ein Fehler (*fault*) vorhanden ist. Zum anderen wird eine Redundanz benötigt, an die im Fehlerfall „übergeben“ werden kann. Abb. 22.2 zeigt schematisch diesen Aufbau. Dieses Prinzip entspricht dem menschlichen Überwacher, der im Fehlerfall eines teilautomatisierten Systems die Fahrzeugführung übernimmt.

Die durchgeführte Betrachtung zeigt, dass Maschinelles Lernen während des Betriebs besonders für die Absicherung des sicheren Verhaltens eine Herausforderung darstellt. Beide Verfahren, sowohl die Runtime Verification & Validation als auch die Verifikation und Validierung durch Monitoring benötigen ein Maß für sicheres Fahren. Ansätze für ein solches Maß werden in Abschn. 22.4.3 vorgestellt.

Einen weiteren Ansatz liefert an dieser Stelle der Vergleich mit dem menschlichen Lernen. Die Teilnehmer des Straßenverkehrs akzeptieren, dass ein Mensch ohne weitere

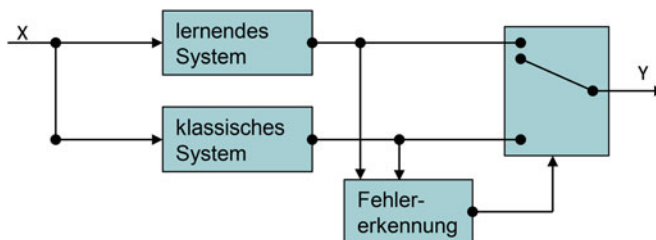


Abb. 22.2 Dynamische Redundanz (nach [32])

Kontrolle basierend auf seinen Maßen für die Fahrzeugführung lernt und sein Verhalten anpasst. Die Überprüfung, ob das angepasste Verhalten den Regeln des Straßenverkehrs genügt, erfolgt nicht direkt, sondern sporadisch über Verkehrs-, oder Geschwindigkeitskontrollen der Polizei. Zusätzlich melden andere Verkehrsteilnehmer schwerwiegendes Fehlverhalten wie z. B. Unfälle, sodass der Mensch dies für den Lernprozess zurückgemeldet bekommt. Übertragen auf das technische System würde dies bedeuten, dass Maschinelles Lernen direkt zu einer Anpassung des Verhaltens führt. Der Test bzw. die Kontrolle, ob diese Anpassung legitim war, erfolgt nachträglich durch andere Verkehrsteilnehmer, die Polizei oder eine spezielle Kontrollinstanz. Dieser Ansatz reduziert die Anforderungen an die Online-Verifikation und -Validierung, denn die Fähigkeiten der anderen Verkehrsteilnehmer werden mit einbezogen. Geschieht der Test erst nach Aktualisierung und Änderung der Funktionen und besteht zusätzlich keine direkte Eingriffsmöglichkeit (Steuerung), wird durch den Betrieb der aktualisierten, aber nicht getesteten Funktion ein erhöhtes Risiko eingegangen.

22.4.2.4 Service

Neben dem Maschinellen Lernen während der Entwicklung und des Betriebs gibt es im Systemlebenszyklus eine weitere Phase, in der gelernt werden kann. Im Rahmen von Serviceangeboten können vom Fahrzeug aufgezeichnete Trainingsdaten heruntergeladen und Funktionen des Fahrzeugs aktualisiert werden. Dafür wird nicht zwangsweise die physikalische Anwesenheit des Fahrzeugs benötigt [33]. Durch dieses Vorgehen wird der Feedback-Loop aus Abb. 22.1 geöffnet. Trainingsdaten und geplante Adaptionen können offline entsprechend einem weiteren Entwicklungsschritt getestet werden, sodass nach dem Nachweis der Sicherheit das Softwaresystem zeitversetzt aktualisiert wird. Da für diese Methoden des Maschinellen Lernens auch personenbezogene Daten das Fahrzeug verlassen könnten, ist zusätzlich zur Sicherheit im Sinne des englischen Begriffs Safety auch der Security-Aspekt zu beachten. Für eine weitergehende Betrachtung wird auf Kap. 24 verwiesen.

22.4.2.5 Nutzerwechsel / Fahrzeugstilllegung

Besitzt das Fahrzeug die angestrebte Möglichkeit, die Ausführung der Fahrzeugführung für einen Nutzer zu personalisieren oder für ein Einsatzgebiet zu optimieren, dann sollten diese erlernten Fähigkeiten bzw. das erlernte Wissen bei einem Nutzerwechsel bzw. einer Fahrzeugstilllegung dem Nutzer und nicht dem Fahrzeug zugewiesen sein. Diese Fähigkeit wird dann besonders interessant, wenn sich beispielsweise beim Vehicle-on-Demand (s. Kap. 2) die Besitzverhältnisse verändern und der Nutzer nicht ein bestimmtes Fahrzeug, sondern nur dessen Mobilitätsdienstleistung erwirbt. Prinzipiell stellt die Übertragung des Wissens für ein technisches System keine Schwierigkeit dar, es ist eher die Stärke des künstlichen Systems, Wissen ohne den langwierigen Lernprozess übertragen zu können. Diese Betrachtung wird in Abschn. 22.5 weiter ausgeführt.

22.4.3 Maße sicheren Fahrens

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, wird sowohl für das generelle Verfahren des Maschinellen Lernens als auch für die Verifizierung und Validierung während des Betriebs die Bewertung der Fahrzeugführung in Bezug auf die Sicherheit benötigt. Zunächst kann natürlich nachträglich bewertet werden, ob ein Unfall stattgefunden und mit welcher Aufprallgeschwindigkeit, Aufprallenergie und Unfallkonstellation sich dieser ereignet hat. Dieses Maß hat den Nachteil, dass der Unfall nach Möglichkeit gar nicht auftreten sollte. Daraus folgt, dass für ein sicheres System der Unfall ein extrem seltenes Ereignis sein wird und somit kaum zum Lernen geeignet ist.

Gesucht ist eine Bewertung, die bereits vor Übertreten der fahrphysikalischen Grenzen eine unsichere Fahrt klassifiziert. Dafür wird nach [34, 35] in der Gefahrenbewertung zwischen deterministischem und stochastischem Verfahren unterschieden.

22.4.3.1 Deterministische Verfahren zur Gefahrenbewertung

Nach [36] wird zusätzlich zwischen Identifikatoren aus der Fahrdynamik und Identifikatoren aus dem Abstand unterschieden. Die am einfachsten zu ermittelnden Werte mit jedoch begrenzter Aussagekraft sind Grenzwerte für Längs- und Querschleunigungen sowie die Gierrate. Bei der 100 Cars Study [37] wurden u. a. Längsbeschleunigungen größer als 0,7 g als Trigger für die Detektion von unsicheren Situationen herangezogen. Die Identifikation einer kritischen Situation ausschließlich bezogen auf Ego-Fahrzeug-Größen ist nicht hinreichend, denn andere Verkehrsteilnehmer können auch ein stehendes Fahrzeug in gefährliche Situationen überführen. Es ist leicht nachzuvollziehen, dass die Sicherheit des Fahrzeugs auch durch andere Verkehrsteilnehmer im Umfeld des Fahrzeugs beeinflusst wird.

Wird das Umfeld für den Anfang zunächst auf den Längsverkehr auf einem Fahrstreifen reduziert, ermöglichen die Time-To-Collision TTC bzw. deren Kehrwert eine Aussage über die Sicherheit der Situation. Beispielsweise definiert die ISO 22839 (Forward vehicle collision mitigation systems) als Zeit

$$TTC = \frac{x_c}{v_r},$$

die vergeht, bis das Ego-Fahrzeug mit dem Objekt im Abstand x_c kollidiert, angenommen die Relativgeschwindigkeit $v_r = (v_{ego} - v_{obj})$ bliebe konstant. Diese Größe kann sowohl für das vorausfahrende als auch das nachfolgende Fahrzeug angewandt werden. Aus der TTC wird bei Chan [38] ein Kritikalitätsmaß definiert, für das angenommen wird, dass die Schwere eines Unfalls mit dem Quadrat der Geschwindigkeit einhergeht:

$$Criticality\ Index = \frac{v^2}{TTC}.$$

Bleibt die Geschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen nicht konstant, wird die Enhanced TTC angewandt. In der ISO 22839 wird diese hergeleitet zu

$$ETTC = \frac{v_r - \sqrt{v_r^2 - 2 \cdot a_r \cdot x_c}}{a_r}.$$

Diese Gleichung gilt nur, solange die relative Beschleunigung $a_r = (a_{obj} - a_{ego})$ konstant bleibt. Verzögert ein Fahrzeug in den Stillstand, ist die Gleichung anzupassen (s. dazu [39]). Bei diesen Werten handelt es sich um Bewertungen eines Zustandes, entsprechend einer Situationsaufnahme. Um die situationsübergreifende Bewertung der Fahrsicherheit zu ermöglichen, werden von [40] folgende Verfahren empfohlen:

- Number Of Conflicts (NOC),
- Time Exposed TTC (TET),
- Time Integrated TTC (TIT).

Die Namen der Verfahren sprechen für sich, sodass an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen, sondern auf [40, 41] verwiesen wird. Weitere einfache Maße sind die Zeitlücke (*time headway*)

$$t_h = \frac{x_c}{v_{ego}}$$

sowie die notwendige Verzögerung a_{req} , um einen Auffahrunfall zu vermeiden. In [41–43] sind weitere Ansätze basierend auf den zuvor erläuterten zu finden.

Werden nun zusätzlich Fahrzeuge, Objekte und Beschleunigungen in lateraler Richtung betrachtet, beispielsweise für die Untersuchung von Kreuzungssituationen, müssen die Maße für eine Sicherheitsbewertung erweitert werden. Der wohl einfachste Ansatz ist die Post-Encroachment Time (PET). Diese zeitliche Größe ist von [44] definiert als “time between the moment that the first road user leaves the path of the second and the moment that the second road user reaches the path of the first”.

Aufgrund der Betrachtung der lateralen Richtung stehen nicht mehr nur zwei Objekt-Fahrzeuge in Beziehung zu dem Ego-Fahrzeug, sondern weitere Objekte. Diese können statisch, aber auch dynamisch aus prinzipiell allen Richtungen der Fahrzeugebene Einfluss auf die Sicherheitsbewertung haben. Tamke [45] liefert hierfür einen Ansatz, indem gegenüber allen Objekten in der Umgebung des Ego-Fahrzeugs beispielsweise mit der euklidischen Norm der Abstand sowie die zeitliche Ableitung des Abstands bestimmt wird. Basierend auf diesen Größen wird die TTC bestimmt, indem mithilfe einer Verhaltensprädiktion die Zeit bis zum Kontakt der Fahrzeughüllen ermittelt wird. Dieser Ansatz wird an dieser Stelle noch den deterministischen Verfahren zugeordnet, da das Verhalten des Ego-Fahrzeugs sowie der dynamischen Objekte dem „constant turn and constant acceleration-Ansatz“ folgen. Der Ansatz an sich liefert jedoch die Möglichkeit, die Prädiktion des Verhaltens auch nichtdeterministisch zu gestalten.

Deterministische Verfahren sind für eine nachträgliche Bewertung der Sicherheit eines erlebten Manövers oder einer Situation geeignet. Wird jedoch auf eine Online-Bewertung von aktuellen Situationen und die Prädiktion auf einen Zeithorizont größer 1 s gezielt, dann ist die Anwendung *per se* fehlerhaft, solange in der Situation Unsicherheiten enthalten sind. Mit Unsicherheiten ist gemeint, dass die Entwicklung der Situation über der Zeit nicht nur einen möglichen deterministischen Verlauf hat, wie oft bei „constant turn and constant acceleration“-Modellen der Einfachheit angenommen wird, sondern viele verschiedene Situationen eintreten können. Beispielsweise könnte das bei der Berechnung der TTC vorausfahrende Fahrzeug auch beschleunigen anstatt weiter zu verzögern und somit eine kritische Situation entschärfen. Um diese Unsicherheiten mit in die Gefahrenbewertung einfließen zu lassen, werden im Folgenden stochastische Verfahren kurz vorgestellt.

22.4.3.2 Stochastische Verfahren zur Gefahrenbewertung

Die Gefahrenbewertung einer einfachen Vorbeifahrt zweier Fahrzeuge, wie in Abb. 22.3 dargestellt, motiviert anschaulich den Einsatz stochastischer Verfahren. Würde von einem deterministischen Verhalten und der Extrapolation von Geschwindigkeit und Lenkwinkel ausgegangen werden, würde eine Vorbeifahrt keine Gefahr bedeuten, denn die Trajektorien bzw. die Aufenthaltsbereiche der Fahrzeuge kreuzen sich nicht. Dies sieht anders aus, wenn Unsicherheiten in Betracht gezogen werden. Wenn das menschgeführte Fahrzeug (s. Abb. 22.3, unterer Fahrstreifen, schwarz) nicht dem Fahrstreifen folgt, können für das autonome Fahrzeug (s. Abb. 22.3, oberer Fahrstreifen, orange) und für das Umfeld Gefahren entstehen.

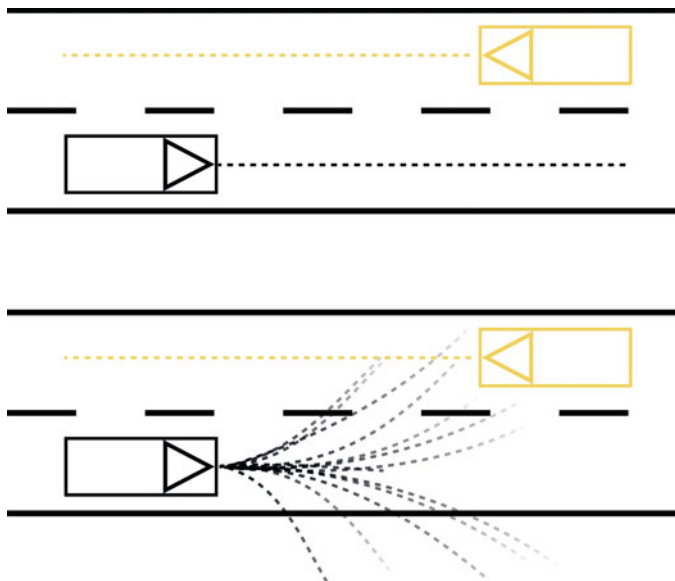


Abb. 22.3 Vergleich Situationsprädiktion einer Vorbeifahrt: deterministisch (oben), stochastisch (unten)

Das damit einhergehende Risiko folgt aus der Wahrscheinlichkeit für einen Unfall sowie aus der potenziellen Schwere dieses Unfalls. Bei beiden Werten handelt es sich um Unbekannte, die es möglichst genau zu schätzen gilt.

Dabei ist der prinzipielle Ansatz [46] für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, die Trajektorien von Ego-Fahrzeug und Objekten im Umfeld, basierend auf gemessenen Zustandsgrößen, zu prädictieren. Aufgrund der erwähnten Unsicherheiten durch den menschlichen Fahrer, durch Sensoren und Aktoren und einer Interaktion zwischen den Objekten gibt es nicht nur die eine Trajektorie, sondern eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustände aller Objekte über der Zeit. Überdecken sich die möglichen Aufenthaltsbereiche der Objekte, besteht eine Wahrscheinlichkeit für einen Unfall. Die möglichen Zustände der Objekte folgen aus eingesetzten dynamischen Modellen und aus definierten Grenzwerten für dynamische Größen. Bei [34] wird dafür ein Einspurmodell für Fahrzeuge eingesetzt, um einen Kompromiss zwischen Prädiktionsgenauigkeit und Rechenaufwand zu finden. Zusätzlich werden die dynamischen Größen wie Beschleunigung und Lenkrate auf – nach Einschätzung des Autors [34] – unkritische und typische Werte begrenzt. In [34, 47] findet sich eine Übersicht über alternative Methoden. Allen Methoden ist gemein, dass die Dynamiksimulation eines Fahrzeugs nicht analytisch erfolgen kann [45], sodass numerische Methoden mit einhergehender Diskretisierung und Vereinfachung einzusetzen sind.

Das Einbeziehen der Schwere in die Gefahrenbewertung wird bei [48] durch eine relative Bewertung jedes Unfalls anhand des unelastischen Stoßes angenähert. Dies entspricht dem auf der Potential Collision Energy (PCE) basierenden Ansatz [40]. Darüber hinaus wurden jedoch keine Ansätze gefunden, die sowohl Schwere als auch Wahrscheinlichkeit in Kombination bestimmen. Ein Grund dafür sind auf der einen Seite ungenaue analytische Regressionsmethoden [49] und auf der anderen Seite rechenintensive Finite-Elemente-Methoden (FEM), die aktuell auch in anderen Bereichen für die Unfallschwerebestimmung eingesetzt werden [50]. Meier et al. [49] liefern hierfür einen neuen Ansatz, der auf symbolischer Regression basiert. Mithilfe einer Datenbank von Crashsituationen (gewonnen durch FEM-Berechnungen) werden Regressionsfunktionen gelernt, die für eine Situation die zugehörige Unfallschwere innerhalb von wenigen Millisekunden vorhersagen. Dafür werden Precrash-Informationen wie Fahrzeugmasse, Geschwindigkeiten, Kollisionspunkt und Kollisionswinkel genutzt. Nachteil dieses Ansatzes ist die bedingte Interpretierbarkeit, da das Regressionsmodell nicht aus physikalischen Größen gebildet wird. Wenn dieser Ansatz eine valide Prädiktion der Schwere liefert, könnte damit die Risikobewertung um eine Schwerebewertung ergänzt werden.

Für die Bewertung der Sicherheit der adaptiven automatisierten Fahrzeugführung sind die vorgestellten Verfahren aktuell aus folgenden Gründen noch nicht umfassend geeignet. Zum einen basieren sämtliche Ansätze auf einer Reihe von Vereinfachungen wie beispielsweise der Vernachlässigung von Wetterbedingungen, der Vereinfachung der Fahrdynamik sowie der fehlenden Betrachtung von Sensorunsicherheiten. Zum anderen bieten die aktuellen Verfahren, wie vorgestellt wurde, noch keine validierte und kombinierte Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten und Schwere von Unfällen. Eine allgemeine Definition und Bewertung der Sicherheit der Fahrzeugführung ist somit aktuell noch nicht gegeben.

Allerdings liefert die voranschreitende Fahrzeugautomatisierung begünstigende Faktoren. Diese sind zum einen das Entfernen der Unsicherheit des Fahrers (Ego-Fahrzeug). Zwar ist menschliches Verhalten durch die anderen Verkehrsteilnehmer weiterhin vorhanden, die Trajektorie des Ego-Fahrzeugs ist jedoch innerhalb der Regelgüte bekannt. Außerdem steigt die Sensorleistungsfähigkeit aktueller Fahrzeuge, sodass Unsicherheiten über die Objektzustände abnehmen. Ferner werden zusätzliche Informationen über das Umfeld per V2X-Kommunikation ausgetauscht und damit die Informationsgrundlage für eine Gefahrenbewertung in Qualität und Quantität verbessert.

22.5 Die Automation als Teil eines lernenden Kollektivs

Die Betrachtung des lernenden Fahrzeugs beschränkte sich in diesem Kapitel bisher auf den Systemlebenszyklus eines speziellen Fahrzeugs. Was die Fahrzeugautomatisierung jedoch implizit mit sich bringt, ist die Vervielfältigung der Hard- und Software durch die angestrebte Serienproduktion auf ein ganzes Kollektiv von Fahrzeugen. Entsprechend würden sich Fahrzeuge im Straßenverkehr bewegen, die gleiche Fähigkeiten aufweisen. Dies hat auf der einen Seite den Nachteil, dass Fehlverhalten, Ausfälle und Unfallarten nicht nur ein Fahrzeug, sondern gleich das gesamte Kollektiv betreffen können. Auf der anderen Seite eröffnet es einen weiteren Freiheitsgrad für adaptive Systeme. Eine Datenaustauschmöglichkeit vorausgesetzt, ergibt sich die Möglichkeit zum Kollektiven Lernen während des Betriebs. Dabei lassen sich prinzipiell zwei Ansätze unterscheiden [51]: das agentenbasierte Maschinelle Lernen und das Maschinelle Lernen mit Agenten. Bei dem agentenbasierten Lernen (auch oft agentenbasierte Schwarmintelligenz genannt) baut sich das lernende kognitive System aus einer Vielzahl von vernetzten Agenten mit begrenzter kognitiver Leistungsfähigkeit auf, dabei wird oft das Verhalten von Tieren wie Ameisen oder Bienen als Beispiel herangezogen [52]. Im Gegensatz dazu besteht das Maschinelle Lernen mit Agenten ebenfalls aus mehreren Agenten, die jedoch die in Abschn. 22.3 beschriebenen Verfahren anwenden. Diese zwei Ansätze unterscheiden sich in den grundlegenden Schritten des Maschinellen Lernens hinsichtlich

- kollektiver Erfahrungsgenerierung,
- kollektiver Leistungsbewertung und
- Ableitung von gelernten Modellen und von Wissen.

Grundsätzlich können, sobald Daten von der realen Situation erzeugt wurden, die Ansätze angewandt werden. Dabei stellt sich die Frage, an welcher Stelle eines Kollektivs aus den Daten relevante Informationen erzeugt werden, diese im Sinne des Lernproblems und des Leistungsmaßes bewertet werden und basierend darauf Lernverfahren eingesetzt werden. Nicht zuletzt aus Gründen der begrenzten Bandbreite für die Datenübertragung wird es notwendig sein, bereits verarbeitete Daten oder sogar die gelernten Modelle und das Wissen zu übertragen, anstelle von Sensorrohdaten. Solange die beteiligten Agenten/Fahrzeuge

dabei einer Serie und einem Softwarestand angehören, folgen Anforderungen an die Integrität der übertragenen Informationen, jedoch nicht an die Kompatibilität und Vertrauenswürdigkeit zwischen den Agenten. Sogenannte homogene Teams existieren, bei denen untereinander bekannt ist, wie und was gelernt wird. Ist das Ziel jedoch, die Datenbasis zu erweitern, auf der Lernverfahren angewandt werden, könnten auch Fahrzeuge anderen Softwarestands oder sogar anderer Hersteller untereinander vernetzt werden. Es entsteht ein Kollektiv aus heterogenen Fahrzeugen, bei denen eventuell unterschiedliche Verfahren des Maschinellen Lernens eingesetzt werden und die Wissensrepräsentation ebenfalls heterogen ist. Gifford [53] zeigt für Beispiele aus anderen Bereichen, wie prinzipiell mit solchen Kollektiven umgegangen werden könnte. Grundsätzlich existieren neben den Fahrzeugrobotern noch weitere Agenten, wie beispielsweise Smartphones oder zukünftig auch Serviceroboter, die ebenfalls Daten erzeugen und damit vollkommen andere Informationsbereiche abdecken, als sie Fahrrobotern zugänglich sind. Die aktuell vorstellbare letzte Stufe der Konnektivität und mit Abstand die größte Datenbasis liefert das Internet. Das autonome Fahrzeug als *web-enabled device* ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen und Funktionen im positiven wie auch im negativen Sinne. Nicht zuletzt das Watson-Projekt von IBM zeigt, dass Teile des im Internet abgelegten Wissens auch für Maschinen verständlich sind. Informationen, die von einer beliebigen Instanz über das Internet zugänglich gemacht werden, müssten somit nicht erst erfahren werden, um das Verhalten des autonomen Fahrzeugs zu beeinflussen. Durch den Zugriff auf beliebige (nicht autorisierte bzw. anonyme) Quellen droht jedoch eine Herausforderung für die Sicherheit sowohl im Sinne der Verkehrssicherheit (*safety*) als auch der Datensicherheit (*security*, s. Kap. 24).

22.6 Fazit

Das Maschinelle Lernen findet in der Forschung aktuell großes Interesse, da die Qualität und Quantität vorhandener Daten stetig zunimmt und zusätzlich die Fahrzeugautomatisierung Fragen aufwirft, die nur bedingt mit herkömmlichen analytischen Ansätzen gelöst werden können. Bei der Übertragung der Ergebnisse von der Forschung auf die Entwicklung der Serienfunktionen für die autonome Fahrzeugführung stellt jedoch vor allem der Nachweis der Sicherheit für den Einsatz im nicht überwachten sicherheitskritischen System ohne Korrekturmöglichkeit eine Herausforderung dar. Deshalb finden sich bereits in aktuellen Serienfahrzeugen nach Wissensstand der Autoren nur gelernte Modelle, die sich nach dem Test und der Freigabe nicht mehr ändern. Systeme wie die Adaptive Transmission Control sind bei dieser Betrachtung aufgrund der geringen adaptiven Parameter in klar begrenzten Wertebereichen ausgeschlossen. Allerdings öffnet gerade das Lernen im Betrieb und somit die Adaption einen weiteren Freiheitsgrad für die Automation. Diesen Freiheitsgrad zu nutzen, motiviert neben der Kompensation des Wegfalls der Anpassungs- und Lernfähigkeit des Menschen sowie der Individualisierung der Fahrzeugführung zusätzlich die Möglichkeit, die autonome Fahrt zu optimieren. Das Kapitel zeigt auf, dass bei der

Anwendung des Maschinellen Lernens für die Fahrzeugautomatisierung während des Betriebs sowohl die Verkehrssicherheit (*safety*) als auch die Datensicherheit (*security*) mit hoher Priorität zu betrachten sind. Für die Bewertung der Verkehrssicherheit respektive des Risikos fehlt aktuell noch ein valides Maß. Deshalb liegt nahe, dass der Einsatz von adaptiven Maschinellen Lernverfahren während des Betriebs zunächst eine fehlertolerante Auslegung mit redundanten herkömmlichen Systemen erfordert, bei denen die herkömmlichen Systeme zur Bewertung der Verkehrssicherheit dienen. Somit ist zu erwarten, dass Maschinelles Lernen während des Betriebs (adaptive Systeme) die Fahrzeugautomatisierung zunächst nur innerhalb eines vorgegebenen Rahmens der herkömmlichen Systeme optimieren wird.

Aufgrund der aufgezeigten Herausforderungen hinsichtlich des Nachweises eines sicheren Verhaltens des zeitvarianten adaptiven Systems erscheint es notwendig, intensiv weiter an einer Runtime-Verifikation und -Validierung zu forschen. Gleiches gilt für die zuvor angesprochenen eingesetzten nicht-adaptiven Systeme und deren Nachweis der Sicherheit. Zwar existiert eine Vielzahl an Literatur über bereits erfolgreich eingeführte Beispiele, jedoch kommen diese zumeist aus anderen Bereichen, die keine vergleichbaren Anforderungen an ein Produkt stellen.

In diesem Beitrag wurde die Frage der Datensicherheit (*security*) nur am Rande diskutiert und stattdessen auf Kap. 24 verwiesen. Ansätze des Lernens benötigen Daten und somit Informationen über Insassen, Fahrzeug und Umwelt. Somit kommt dem Datenschutz eine der Verkehrssicherheit (*safety*) gleiche Relevanz zu. Anzumerken ist, dass die Umwelt natürlich auch die Personen in dieser und somit deren Datenschutz beinhaltet. Die Qualität und Quantität der für die Fahrzeugautomation benötigten Sensoren ist auf der einen Seite Antreiber des Maschinellen Lernens, aber auf der anderen Seite jedem Datenschützer suspekt. Eine besondere Eigenschaft der Fahrzeugsensoren ist zusätzlich, dass diese aktuell zu einem Großteil nicht physikalisch abgedeckt werden, wenn das Fahrzeug oder die Funktion nicht aktiv ist. Mit dem Einsatz des Maschinellen Lernens sollte dementsprechend direkt auch die Datensicherheit angesprochen werden.

Nichtdestotrotz bringt gerade der Einsatz von vernetzten Agenten und lernenden Systemen Vorteile, deren Auswirkungen nicht abzuschätzen sind. Kollektiv lernende Agenten müssen sich vorhandenes Wissen nicht langwierig aneignen, sondern können es per Datenübertragung (*copy & paste*) an nächste Fahrzeug- bzw. -Softwaregenerationen übergeben. Dies, verbunden mit einem Zugriff auf die große Menge von elektronisch erfassten Informationen, besitzt das Potenzial, die Fahrzeugführung, den Straßenverkehr und somit das ganze (Mobilitäts-)Verhalten der Menschen zu verändern. Dabei sind die Erkenntnisse, die für die Fahrzeugführung gewonnen werden, in gleichem Maße für die Forschung an medizinischen Robotern sowie Haushaltsrobotern mit Menschenkontakt von Interesse. Aufgrund der ähnlichen Rahmenbedingungen gilt Gleiches auch umgekehrt, was für eine enge Zusammenarbeit zwischen Fahrzeugtechnik und Robotik spricht.

Literatur

1. Rasmussen, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics SMC-13*(3), 257–266 (1983)
2. Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, Hakuli, Wolf (Hrsg.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pp. 15–23 (2011)
3. Oswald, W.D.: Automobilismus und die „gefährlichen Alten“. In: G. Schmidt (Hrsg.) *Technik und Gesellschaft. Automobil und Automobilismus*, vol. 10, pp. 183–195 (1999)
4. Williams, A.F.: Teenage drivers: patterns of risk. *Journal of safety research* 34(1), 5–15 (2003)
5. Burgard, E.: Fahrkompetenz im Alter: Die Aussagekraft diagnostischer Instrumente bei Senioren und neurologischen Patienten. Dissertation, LMU (2005)
6. Funk, W., Grüninger, M., Dittrich, L., Göbler, J., Hornung, C., Kreßner, I., Libal, I., Limberger, S., Riedel, C., Schaller, S.: Begleitetes Fahren ab 17 – Prozessevaluation des bundesweiten Modellversuchs. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Mensch und Sicherheit*.(213) (2010)
7. Mitchell, T.M.: *Machine Learning*. McGraw-Hill series in computer science. McGraw-Hill, New York (1997)
8. Breiman, L.: Statistical Modeling: The Two Cultures (with comments and a rejoinder by the author). *Statist. Sci.*, 199–231 (2001)
9. Carbonell, J., Michalski, R., Mitchell, T.: An Overview of Machine Learning. In: Michalski, R., Carbonell, J., Mitchell, T. (Hrsg.) *Machine Learning. Symbolic Computation*, pp. 3–23. Springer Berlin Heidelberg (1983)
10. Ertel, W.: *Grundkurs Künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung*, 3rd edn. Lehrbuch. Springer Fachmedien, Wiesbaden (2013)
11. Sewell, M.: *Machine Learning*. <http://machine-learning.martinsewell.com/> (zuletzt geprüft 15.07.2014) (2009)
12. Sammut, C. (ed.): *Encyclopedia of machine learning*. 78 tables. springer reference. Springer, New York (2011)
13. Shaoning Pang, Nikola Kasabov: Inductive vs transductive inference, global vs local models: SVM, TSVM, and SVMT for gene expression classification problems – Neural Networks. *Proceedings. 2004 IEEE International Joint Conference on* (2004)
14. Russell, S., Norvig, P., Intelligence, A.: *A modern approach. Artificial Intelligence*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs 25 (1995)
15. March, J.G.: Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization science* 2(1), 71–87 (1991)
16. Nusser, S.: *Robust Learning in Safety-Related Domains. Machine Learning Methods for Solving Safety-Related Application Problems*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2009)
17. Nusser, S., Otte, C., Hauptmann, W., Leirich, O., Krätschmer, M., Kruse, R.: Maschinelles Lernen von validierbaren Klassifikatoren zur autonomen Steuerung sicherheitsrelevanter Systeme. *at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik* 57(3), 138–145 (2009)
18. Pomerleau, D.: Neural Network Vision for Robot Driving. In: Hebert, M., Thorpe, C., Stentz, A. (Hrsg.) *Intelligent Unmanned Ground Vehicles*, vol. 388. The Springer International Series in Engineering and Computer Science, pp. 53–72. Springer US (1997)
19. Gusikhin, O., Rychtyckyj, N., Filev, D.: Intelligent systems in the automotive industry: applications and trends. *Knowl Inf Syst* 12(2), 147–168 (2007). doi: 10.1007/s10115-006-0063-1
20. DIN 31000:2011-05: Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten von Produkten

21. Deng, L., Li, X.: Machine Learning Paradigms for Speech Recognition: An Overview. *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.* 21(5), 1060–1089 (2013). doi: 10.1109/TASL.2013.2244083
22. Caelen, O., Bontempi, G., Barvais, L.: Machine learning techniques for decision support in anesthesia. In: *Artificial Intelligence in Medicine*, pp. 165–169. Springer (2007)
23. Widodo, A., Yang, B.-S.: Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 21(6), 2560–2574 (2007). doi: 10.1016/j.ymssp.2006.12.007
24. Bainbridge, L.: Ironies of automation. *Automatica* 19(6), 775–779 (1983). doi: 10.1016/0005-1098(83)90046-8
25. Otte, C.: SCI 445 – Safe and Interpretable Machine Learning: A Methodological Review. In: Moewes, C., Nürnberger, A. (Hrsg.) *Computational intelligence in intelligent data analysis. Studies in computational intelligence*, vol. 445. Springer, Berlin, New York (2013)
26. Burgdorf, F.: Eine kunden- und lebenszyklusorientierte Produktfamilienabsicherung für die Automobilindustrie, KIT Scientific Publishing; Karlsruher Institut für Technologie (2010)
27. Taylor, B.J.: *Methods and procedures for the verification and validation of artificial neural networks*. Springer (2006)
28. Nelles, O.: Lernfähige Fuzzy-basierte Fahrstrategie für automatische Getriebe. In: Isermann, R. (Hrsg.) *Modellgestützte Steuerung, Regelung und Diagnose von Verbrennungsmotoren*, pp. 233–250. Springer Berlin Heidelberg (2003)
29. Cao, C.T., Kronenberg, K., Poljansek, M.: Adaptive transmission control. Google Patents. <http://www.google.com/patents/US5954777> (1999)
30. Dahm, W.: Perspectives on Verification and Validation in Complex Adaptive Systems, Notre Dame University. Workshop on Verification and Validation in Computational Science (2011). Accessed 22 July 2014
31. Tamura, G., Villegas, N., Müller, H., Sousa, J., Becker, B., Karsai, G., Mankovskii, S., Pezzè, M., Schäfer, W., Tahvildari, L., Wong, K.: Towards Practical Runtime Verification and Validation of Self-Adaptive Software Systems. In: Lemos, R. de, Giese, H., Müller, H., Shaw, M. (Hrsg.) *Software Engineering for Self-Adaptive Systems II*, vol. 7475. Lecture Notes in Computer Science, pp. 108–132. Springer Berlin Heidelberg (2013)
32. Isermann, R.: *Fault-diagnosis systems. An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer, Berlin, New York (2006)
33. Stokar, R. von: Software-Updates Effiziente Nutzung von Connected Cars. *ATZ Elektron* 9(1), 46–51 (2014). doi: 10.1365/s35658-014-0387-7
34. Eugen Käfer: *Situationsklassifikation und Bewegungsprognose in Verkehrssituationen mit mehreren Fahrzeugen*, Universität Bielefeld (2013). Accessed 7 July 2014
35. Eidehall, A., Petersson, L.: Statistical Threat Assessment for General Road Scenes Using Monte Carlo Sampling. *Intelligent Transportation Systems*, *IEEE Transactions on* 9(1), 137–147 (2008). doi: 10.1109/TITS.2007.909241
36. Benmimoun, M., Fahrenkrog, F., Zlocki, A., Eckstein, L.: Erkennung und Klassifizierung Kritischer Fahrsituationen Mittels Fahrzeugdaten. *ATZ Automobiltech Z* 114(10), 820–826 (2012). doi: 10.1007/s35148-012-0485-x
37. Guo, F., Klauer, S., Hankey, J., Dingus, T.: Near Crashes as Crash Surrogate for Naturalistic Driving Studies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2147(–1), 66–74 (2010). doi: 10.3141/2147-09
38. Ching-Yao Chan (ed.): *Defining Safety Performance Measures of Driver-Assistance Systems for Intersection Left-Turn Conflicts*. *Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE*. *Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE* (2006)
39. Winner, H., Geyer, S., Sefati, M.: Maße für den Sicherheitsgewinn von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, H., Bruder, R. (Hrsg.) *Maßstäbe des sicheren Fahrens. 6. Darmstädter Kolloquium Mensch + Fahrzeug*. *Ergonomia Verlag, Stuttgart* (2013)

40. Dijkstra, A., Drolenga, H.: Safety effects of route choice in a road network. Simulation of changing route choice. SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, Netherlands (2008)
41. Yang, H.: Simulation-based evaluation of traffic safety performance using surrogate safety measures (2012)
42. Zhang, Y., Antonsson, E.K., Grote, K.: A new threat assessment measure for collision avoidance systems. Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC '06. IEEE
43. Jansson, J.: Collision avoidance theory with application to automotive collision mitigation. Linköping studies in science and technology. Dissertations, vol. 950. Dept. of Electrical Engineering, Univ., Linköping (2005)
44. Horst, A. R. A. van der: A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters. Institute for Perception TNO, Soesterberg, Netherlands (1990)
45. Tamke, A., Dang, T., Breuel, G.: A flexible method for criticality assessment in driver assistance systems. Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE
46. Althoff, M., Stursberg, O., Buss, M.: Model-Based Probabilistic Collision Detection in Autonomous Driving. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 10(2), 299–310 (2009). doi: 10.1109/TITS.2009.2018966
47. Althoff, D., Wollherr, D., Buss, M.: Safety assessment of trajectories for navigation in uncertain and dynamic environments. Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on
48. Althoff, D., Kuffner, J., Wollherr, D., Buss, M.: Safety assessment of robot trajectories for navigation in uncertain and dynamic environments. Auton Robot 32(3), 285–302 (2012). doi: 10.1007/s10514-011-9257-9
49. Meier, A., Gonter, M., Kruse, R.: Symbolic Regression for Precrash Accident Severity Prediction. In: Polycarpou, M., Carvalho, A. de, Pan, J.-S., Woźniak, M., Quintian, H., Corchado, E. (Hrsg.) Hybrid Artificial Intelligence Systems, vol. 8480. Lecture Notes in Computer Science, pp. 133–144. Springer International Publishing (2014)
50. Mukherjee, S., Chawla, A., Mohan, D., Singh, M., Dey, R.: Effect of vehicle design on head injury severity and throw distance variations in bicycle crashes. Proceedings From 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Lyon (2007)
51. Czarnowski, I., Jędrzejowicz, P.: Machine Learning and Multiagent Systems as Interrelated Technologies. In: Czarnowski, I., Jędrzejowicz, P., Kacprzyk, J. (Hrsg.) Agent-Based Optimization, vol. 456. Studies in computational intelligence, pp. 1–28. Springer Berlin Heidelberg (2013)
52. Miller, P.: Die Intelligenz des Schwarms. Was wir von Tieren für unser Leben in einer komplexen Welt lernen können. Campus-Verl., Frankfurt am Main [u.a.] (2010)
53. Gifford, C.M.: Collective Machine Learning: Team Learning and Classification in Multi-agent Systems. Dissertation, University of Kansas (2009)

Andreas Reschka

Inhaltsverzeichnis

23.1 Einleitung 490

23.2 Sicherer Zustand 490

 23.2.1 Sicherer Zustand in Fahrerassistenzsystemen im Serieneinsatz 491

 23.2.2 Sicherer Zustand in Versuchsträgern zum autonomen Fahren 493

 23.2.3 Zusammenfassung 496

23.3 Sicherheitskonzepte aus anderen Disziplinen 496

 23.3.1 Schienenfahrzeuge 496

 23.3.2 Rein elektrische Ansteuerung von Aktoren (X-by-Wire) 497

 23.3.3 Robotik 498

 23.3.4 Kraftwerkstechnik 499

23.4 Sichere Zustände in den Use-Cases 500

 23.4.1 Use-Case 1: Autobahnavtomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpiilot 500

 23.4.2 Use-Case 2: Autonomes Valet-Parken 501

 23.4.3 Use-Case 3: Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer 503

 23.4.4 Use-Case 4: Vehicle-on-Demand 503

 23.4.5 Zusammenfassung 504

23.5 Sicherheitsrelevante Ereignisse 504

23.6 Aktionen zur Reduzierung des Risikos 505

23.7 Antizipation von Degradationssituationen 506

A. Reschka (✉)
Technische Universität Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Deutschland
reschka@ifr.ing.tu-bs.de

23.8 Dilemma-Situationen	507
23.9 Zusammenfassung	509
Literatur	510

23.1 Einleitung

Die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen fokussiert sich derzeit auf die Funktionalitäten von Fahrzeugführungssystemen. In zahlreichen Demonstrationen von Versuchsfahrzeugen wurden beeindruckende Fähigkeiten gezeigt (im Folgenden werden die neuesten zuerst genannt). So z. B. bei der Fahrt auf der Bertha-Benz-Route des Karlsruher Instituts für Technologie und der Daimler AG [69], im Projekt Stadtpilot der Technischen Universität Braunschweig [41], [60] den Aktivitäten der Google Inc. [13], [59], dem Forschungsfahrzeug BRAiVE und dem VIAC Projekt des VisLab-Instituts der Università degli Studi di Parma [4], [8], den Forschungsaktivitäten des Sonderforschungsbereichs 28 der Deutschen Forschungsgemeinschaft [31], [55], [57] und den Resultaten bei der DARPA Urban Challenge [51], [52], [53]. Falls die Versuchsträger am öffentlichen Straßenverkehr teilnahmen, war immer ein Sicherheitsfahrer an Bord, der das technische System überwacht hat. Dieser musste eingreifen, falls ein technischer Defekt auftrat, die aktuelle Situation die Fähigkeiten des Fahrzeugs überforderte oder ein anderes Ereignis dies erforderlich machte. Durch diese notwendige Überwachung des technischen Systems sind die gezeigten Versuchsfahrten im öffentlichen Straßenverkehr nach der Klassifikation von Automatisierungsgraden nach [20] als *teilautomatisiert* einzustufen. Das Ziel zukünftiger Fahrzeugführungssysteme mit höheren Automatisierungsgraden ist jedoch, die Systeme selbstständig in allen Situationen auch ohne überwachende Menschen betreiben zu können.

Bei der Entwicklung von Fahrzeugführungssystemen ist daher ein Sicherheitskonzept notwendig, das die verschiedenen Schritte im Entwicklungsprozess wie z. B. die Spezifikation, den Entwurf, die Entwicklung und den Test der Funktionen abdeckt. Außerdem sind Sicherheitsfunktionen im System notwendig, die einen sogenannten *sicheren Zustand* erreichen können bzw. diesen zu erhalten versuchen.

23.2 Sicherer Zustand

Die Verwendung des Begriffs *sicherer Zustand* ist oftmals nicht eindeutig. Sicherheit als relatives Maß ist abhängig von einer individuellen Einschätzung des Betrachters. Sicherheit besteht nach der Norm ISO 26262 in einem Betriebsmodus eines Systems oder einer Anordnung von Systemen, ohne *unzumutbares* Risiko (vgl. „safe state“, ISO 26262, Part I, 1.102 [30]). Dies beinhaltet, dass Sicherheit nur dann vorliegt, wenn das aktuelle und das zukünftige Risiko unterhalb einer von einer Gesellschaft akzeptierten Schwelle liegen (vgl.

„unreasonable risk“, ISO 26262, Part I, 1.136 [30]). Diese Schwelle ist als nicht akzeptabler Wert in einem spezifischen Kontext gemäß gesellschaftlicher, moralischer und ethischer Auffassungen zu sehen (vgl. ISO 26262, Part I, 1.136 [30]). Unter Risiko wird eine Kombination aus der Auftrittswahrscheinlichkeit und der Schwere eines Personenschadens verstanden (vgl. „risk“ und „harm“, ISO 26262, Part I, 1.99 und 1.56).

Aus diesem Verständnis lässt sich ein sicherer Zustand als ein Zustand mit zumutbarem Risiko eines Systems verstehen. Der häufig verwendete Begriff *risikominimaler Zustand* (z. B. in [20]) ist missverständlich, da dieser das Risiko nicht in eine Relation zu einem akzeptierten Risiko stellt und auch keine Aussage darüber enthält, ob ein System, das risikominimal betrieben wird, auch sicher ist.

Die wesentliche Herausforderung bei der Verwendung des Begriffs *sicherer Zustand* im Sinne eines Zustands mit zumutbarem Risiko für Insassen und weitere Verkehrsteilnehmer ist die Identifikation einer Schwelle, unterhalb der ein Risiko zumutbar ist. Beim Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs hängt das zumutbare Risiko von der aktuellen *Situation*, in der sich das Fahrzeug befindet, ab. Zur Situation gehören hier analog zu [21] und [43]

- alle für eine Fahrentscheidung relevanten stationären und dynamischen Objekte,
- die Intention der dynamischen Objekte einschließlich des autonomen Fahrzeugs,
- die geltenden rechtlichen Bedingungen,
- die Mission des autonomen Fahrzeugs,
- die aktuelle Leistungsfähigkeit des autonomen Fahrzeugs.

Für ein autonomes Fahrzeug ist daher eine kontinuierliche Ermittlung des aktuellen Risikos basierend auf der aktuellen Situation und ein Abgleich des Risikos mit dem Schwellwert, der als gerade noch zumutbar gilt, notwendig. Im Sinne der Norm ISO 26262 bedeutet dies, dass für jede Situation und ihre zukünftig möglichen Entwicklungen die Auftrittswahrscheinlichkeit für einen Personenschaden und die Schwere des Personenschadens für jeden beteiligten Verkehrsteilnehmer ermittelt und dann die Handlungsoptionen identifiziert werden müssen, die ein zumutbares Risiko ergeben. Eine technische Lösung für dieses Problem ist dem Autor bisher nicht bekannt.

23.2.1 Sicherer Zustand in Fahrerassistenzsystemen im Serieneinsatz

In Fahrerassistenzsystemen überwacht der Fahrer das technische System und muss dem Verkehrsgeschehen aufmerksam folgen. Er wird bei der Fahraufgabe unterstützt. In der aktuellen S-Klasse von Mercedes-Benz wird das „DISTRONIC PLUS mit Lenk-Assistent und Stop&Go Pilot“ genannte System angeboten, das den Fahrer sowohl bei der Längsführung als auch bei der Querführung unterstützt [49]. Der Fahrer muss jedoch weiterhin dem Verkehrsgeschehen folgen, und die Querführung deaktiviert sich nach einer gewissen Zeit, falls der Fahrer die Hände vom Lenkrad nimmt:

Erkennt der Lenk-Assistent mit Stop&Go Pilot, dass der Fahrer während der Fahrt die Hände vom Lenkrad nimmt, wird der Fahrer intelligent in Abhängigkeit von der Fahrsituation, des Handmomentensensors, der erfassten Umgebung und der Geschwindigkeit optisch im Kombiinstrument gewarnt. Reagiert der Fahrer nicht, ertönt ein Warnton und die Querführung wird deaktiviert. [49]

Durch diese Eigenschaft ist das System als teilautomatisiert nach [20] bzw. *Partial Automation* nach [48] einzustufen. Die Längsführung kann sich ebenfalls beenden und bei geeigneter Signalisierung an den Fahrer übergeben, sobald es zu technischen Störungen kommt oder, je nach Auslegung des Systems, Systemgrenzen wie z. B. eine minimale Geschwindigkeit unterschritten werden [62].

In [25] wurde 2010 ein Sicherheitskonzept für teilautomatisierte und hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme vorgestellt. Jedoch wurden die Begriffe hier noch anders verwendet. In [25] bedeutete *Fully Automated DAS* (FA-DAS) eigentlich *teilautomatisiert* nach [20], da der Fahrer die Quer- und die Längsführung überwachen muss. *Autonomous DAS* (A-DAS) in [25] ist gleichbedeutend mit *vollautomatisiert* nach [20], da der Fahrer nicht dauerhaft überwachen muss und das System selbstständig einen sicheren Zustand erlangen kann. Nach [24] wird der sichere Zustand durch ein Anhalten an einem ungefährlichen Ort erreicht. Da der Fokus auf einem System zur automatisierten Staufahrt auf der Autobahn bis maximal 60 km/h liegt, erscheint das Anhalten auf einem Fahrstreifen als sicherer Zustand, bis ein Mensch die Kontrolle übernimmt. Die relativen Geschwindigkeiten werden aufgrund der Stausituation als gering angenommen [24], [25].

Zum gleichen Ergebnis kommt auch eine Studie zum Potenzial der automatisierten Fahrt auf Autobahnen [45]. Diese entstand im Rahmen der Entwicklung eines Notfallassistenzsystems, das ein Fahrzeug stoppen kann (sicherer Zustand), falls der Fahrer das Bewusstsein verliert oder aus anderen Gründen nicht mehr zur Fahrzeugführung in der Lage ist [32], [45]. Auch in [37] wird ein solches System vorgestellt. Die Sicherheitsanforderungen sind hier höher als bei einem Stauassistenzsystem, da das Fahrzeug nicht einfach anhalten, sondern den fließenden Verkehr verlassen und auf dem Seitenstreifen stoppen soll. Außerdem ist das System auch für den normalen Autobahnverkehr und nicht nur für den Stau konzipiert, sodass es zu sehr hohen relativen Geschwindigkeiten kommen kann. Daraus ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Umfeldwahrnehmung, da andere Verkehrsteilnehmer bei den Fahrstreifenwechseln auf den Seitenstreifen beachtet werden müssen [45]. Redundante Sensorik zumindest für den Bereich vor, hinter und bei Rechtsverkehr auch rechts neben dem Fahrzeug ist hier erforderlich. Der Nutzen solcher Notfallassistenzsysteme ist dennoch vorhanden, auch wenn das System aufgrund technischer Probleme nicht voll einsatzfähig ist. Ein unkontrolliert fahrendes Fahrzeug auf der Autobahn ist gefährlicher als ein kontrolliert langsam fahrendes oder stehendes Fahrzeug, das durch geeignete Signalisierung auf sich aufmerksam machen kann – selbst wenn der Wechsel auf den Seitenstreifen nicht möglich ist [32], [37].

Zusammenfassend lässt sich für Fahrerassistenzsysteme sagen, dass bei Verfügbarkeit eines Fahrers im Fahrzeug ein sicherer Zustand entweder mit der Übergabe an diesen oder

mit dem Bremsen in den Stillstand erreicht werden kann. Wie bei dem vorgestellten Notfallassistentensystem kann zwar versucht werden, den Seitenstreifen zu erreichen, jedoch sind die Anforderungen hierfür relativ hoch. Auch bei höher automatisierten Systemen stellen die Übergabe an einen möglichen Verfügbarkeitsfahrer und die Abbremsung in den Stillstand mögliche Aktionen zur Erhaltung und Erlangung eines sicheren Zustands dar.

23.2.2 Sicherer Zustand in Versuchsträgern zum autonomen Fahren

Im Fokus der im Folgenden vorgestellten Projekte steht das autonome Fahren auf allen Straßenarten und in allen Umgebungen. Die entwickelten Systeme sollen die Fahraufgabe vollständig übernehmen können und den Menschen als Überwacher nicht mehr benötigen. Über die Sicherheitsfunktionen und Sicherheitskonzepte der verschiedenen Projekte gibt es nur wenige Veröffentlichungen. Dies kann u. a. daran liegen, dass es relativ einfach ist, den Fahrer weiterhin als Überwacher einzusetzen und daher keine umfangreichen Sicherheitssysteme zu nutzen, oder auch daran, dass der funktionalen Sicherheit der Systeme für den fahrerlosen Betrieb bisher keine angemessene Aufmerksamkeit zukommt. Die betrachteten Projekte sind im Folgenden chronologisch gelistet, der erreichte Automatisierungsgrad nach [20] und die eingesetzten Sicherheitsmechanismen werden hervorgehoben.

Die Projekte der 1950er- bis in die 1990er-Jahre fokussierten sich nur auf die funktionalen Aspekte der maschinellen Fahrzeugführung wie z. B. die ersten Ansätze zur Verknüpfung von Infrastruktur und Fahrzeug in den General Motors Research Labs, wo Magnete in die Fahrbahn eingelassen wurden, die dann vom Fahrzeug erkannt werden konnten. Der Fahrer musste dabei ständig auf den Verkehr achten und das System überwachen [17]. In Japan wurde in den 1970er- und 1980er-Jahren die Fahrzeugautomatisierung durch Erkennung von Fahrstreifen mit bildgebenden Kameras erforscht. Auch hier wurde das System dauerhaft vom Fahrer überwacht [58]. Gleiches gilt für die Aktivitäten in den 1990er-Jahren, beispielsweise bei der Demonstration *No Hands Across America* 1995 der Carnegie Mellon University [50], [56]. Hier wurde nur die Querführung maschinell durchgeführt. Auf europäischer Seite ist eine Versuchsfahrt der Universität der Bundeswehr von München nach Odense mit dem Versuchsträger *VaMoRs-P* ebenfalls im Jahr 1995 hervorzuheben. Bei dieser Fahrt wurde die Längs- und Querführung maschinell durchgeführt und vom Fahrer überwacht. Zusätzlich wurden automatische Fahrstreifenwechsel vom Fahrer ausgelöst [36]. Mit dem Versuchsträger *ARGO* des VisLab-Instituts der Università degli Studi di Parma erfolgten ebenfalls Langstreckenfahrten im Jahr 1998. Die Automatisierung deckte neben der Längs- und Querführung auch Fahrstreifenwechsel ab, die vom Sicherheitsfahrer ausgelöst wurden [7]. Alle genannten Projekte sind als teilautomatisiert nach [20] einzuordnen. Der sichere Zustand wurde durch eine Übergabe an den Sicherheitsfahrer erreicht bzw. durch einen Eingriff des Sicherheitsfahrers in die Fahrzeugführung wiederhergestellt. Einen ausführlicheren Einblick in die Entwicklungen in den 1990er-Jahren gibt Dickmanns in [14] mit einem Fokus auf kamerabasierte Bildverarbeitung.

Tabelle 23.1 Fehlercodes (übersetzt aus dem Englischen, aus [6])

Fehlercode	Bedeutung	Aktion
F0	„OK!“	keine Aktion
F1	„Wartung notwendig“	notwendige Wartung berücksichtigen
F2	„Nach Hause zurückkehren“	Rückkehr zur Wartungsstation mit reduzierter Geschwindigkeit
F3	„Sicheres Parken“	auf dem nächsten verfügbaren Parkplatz anhalten
F4	„Sofortiges Anhalten“	sofortiges Anhalten des Fahrzeugs am Straßenrand ohne Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer
F5	„Nothalt“	sofortiges kontrolliertes Bremsen in den Stillstand (mit Lenkfunktion, falls möglich)
F6	„Notbremsung“	sofortiges Stoppen des Fahrzeugs durch Betätigung der Bremsen

Im Projekt *Autonomes Fahren* in Niedersachsen wurde 1998 ebenfalls an der Entwicklung autonomer Fahrzeuge geforscht. In [6] wird ein Sicherheitskonzept beschrieben, das verschiedene Methoden enthält, die auch für heutige Systeme denkbar und sinnvoll sind. In Tab. 23.1 sind Fehlercodes, deren Bedeutung und Aktionen enthalten, die zur Erlangung eines sicheren Zustands vom Fahrzeug ausgeführt werden können. Die gewählte Kategorisierung ist auch für hoch- und vollautomatisierte Systeme nach [20] möglich. Eine ausführlichere Diskussion der Aktionen folgt bei der Betrachtung der jeweiligen sicheren Zustände zu den Use-Cases aus Kap. 2.

In der DARPA Urban Challenge wurden alle teilnehmenden autonomen Fahrzeuge ohne Fahrer an Bord auf einem abgesperrten Militärstützpunkt betrieben. Das Sicherheitskonzept wurde von der DARPA vorgegeben und beinhaltete eine Möglichkeit zum sofortigen Anhalten der Fahrzeuge über eine Fernsteuerung und über Not-/Aus-Schalter außen an den Fahrzeugen [2]. Das Sicherheitskonzept des Teams CarOLO der Technischen Universität Braunschweig nutzte die Zeit nach dem Nothalt, um Aktionen der Selbstheilung durchzuführen [19], [22], [44]. Dadurch war das autonome Fahrzeug in der Lage, fehlerhafte Komponenten des Fahrzeugführungssystems neu zu starten [2]. Ähnlich sind auch die anderen Teams im Finale der Urban Challenge vorgegangen [51], [52], [53].

Der Nothalt über eine Fernsteuerung als letzte Aktion zur Erreichung eines sicheren Zustands war nur möglich, weil die Fahrzeuge auf einem abgesperrten Gebiet fuhren, von überwachenden Fahrzeugen verfolgt wurden und die anderen Verkehrsteilnehmer entweder von professionellen Fahrern geführte Fahrzeuge oder autonome Fahrzeuge waren. Im öffentlichen Straßenverkehr wäre eine Fahrt mit den Leistungsfähigkeiten der Versuchsträger zu gefährlich gewesen.

Im Projekt Stadtpilot der Technischen Universität Braunschweig wird teilautomatisiertes Fahren seit 2010 im öffentlichen Straßenverkehr gezeigt [41], [60]. Die Forschung in diesem Projekt ist auf den vollautomatisierten Betrieb des Versuchsträgers *Leonie* ausge-

richtet. Bei der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr muss jedoch ein Sicherheitsfahrer den Verkehr überwachen und eingreifen, bevor es zu gefährlichen Situationen kommen kann.

Das Fahrzeugführungssystem übergibt die Kontrolle an den Sicherheitsfahrer, falls es an Systemgrenzen stößt bzw. Fehler im System auftreten. Da im öffentlichen Straßenverkehr keine anderen Sicherheitsaktionen durchgeführt werden, ist der sichere Zustand die Übergabe an den Fahrer. Da das System in Teilen in der Lage ist, die eigene Leistungsfähigkeit zu ermitteln, wie z. B. die Güte der Lokalisierung, sind auch andere Aktionen möglich. Beispielsweise ist ein Anhalten am Straßenrand oder auch auf dem aktuellen Fahrstreifen denkbar, eine Weiterfahrt mit erhöhten Sicherheitsabständen und mit reduzierter Geschwindigkeit ist ebenfalls möglich, wird bisher aber nur auf dem Testgelände durchgeführt [46], [47].

Mit dem autonomen Versuchsträger Junior 3 demonstrierten die Stanford University und das Volkswagen Electronic Research Lab 2010 automatisiertes Fahren [35], [54]. Der Aufbau des Versuchsträgers ist dem Versuchsträger Leonie aus dem Projekt Stadtpilot ähnlich. Die Aktivierung von automatisierten Fahrfunktionen wird über *silver switches* gesteuert. Diese ermöglichen eine Verbindung zwischen dem Fahrzeugführungssystem und der Aktorik des Fahrzeugs. Im *Fail-safe*-Zustand sind diese Schalter geöffnet, und es besteht keine Verbindung zwischen Fahrzeugführungssystem und Fahrzeug. Dadurch liegt die Kontrolle beim notwendigen Sicherheitsfahrer. Eine Besonderheit ist die Valet-Parken-Funktion des Fahrzeugs, die auf einem abgesperrten Gelände auch ohne Sicherheitsfahrer genutzt werden kann. Zur Sicherheit verfügt das Fahrzeug über eine *e-stop* genannte Funktion, die in ähnlicher Weise auch in der DARPA Urban Challenge genutzt wurde. Die Überwachung des Systems wird mit einem *Health Monitor* realisiert, der Fehlfunktionen von Softwaremodulen erkennt und Funktionen zur Selbstheilung auslöst. Außerdem ist das Fahrzeug selbstständig in der Lage, im Notfall die Bremsen zu betätigen und anzuhalten. Das stehende Fahrzeug ist somit der sichere Zustand, der über den *e-stop* und durch das Sicherheitssystem erreicht wird.

Das VisLab-Institut der Università degli Studi di Parma zeigte 2012 mit dem Versuchsträger BRAiVE teilautomatisiertes Fahren im öffentlichen Straßenverkehr auf einer teilweise gesperrten Strecke. Auf Teilstücken der Strecke war kein Fahrer auf dem Fahrersitz, und nur der Beifahrer konnte über einen Not/Aus-Schalter in die Fahrzeugführung eingreifen. Außerdem war ebenfalls eine *e-stop*-Funktionalität integriert [8], [23].

An der Carnegie Mellon University wurde nach der DARPA Urban Challenge weiter am Versuchsträger BOSS gearbeitet und ein Ansatz zur Überwachung und Rekonfiguration in Echtzeit entwickelt und veröffentlicht [33]. Dieser *SAFER* genannte Ansatz nutzt redundante Softwarekomponenten, die sich im Normalbetrieb im Stand-by befinden und bei Bedarf aktiviert werden können. Dadurch ist es möglich, innerhalb kürzester Zeit von einer defekten Komponente auf eine redundante Lösung umzuschalten. Da keine Hardwareüberwachung stattfindet, werden auch keine Sensoren und Aktoren überwacht, wodurch der Ansatz als Ergänzung zu Methoden der Hardwareredundanz zu nutzen ist.

Als letztes Beispiel für die derzeitige Entwicklung von autonomen Fahrzeugen soll das Projekt *Self Driving Car* der Google Inc. betrachtet werden. Zunächst wurden in diesem Projekt seriennahe Fahrzeuge mit Sensorik ausgestattet und im öffentlichen Verkehr in

Nevada und Kalifornien betrieben [13], [59]. Obwohl es nur spärliche Informationen über die genutzte Technologie in den Fahrzeugen gibt, erscheint ein Einsatz ohne Sicherheitsfahrer bisher noch nicht möglich. Wie in [13] beschrieben, gibt es zahlreiche Situationen, die die Leistungsfähigkeit des Systems übersteigen. Der sichere Zustand bei diesen Fahrzeugen ist ebenfalls die Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer. 2014 wurde ein Prototyp vorgestellt, der nicht mehr über Bedienelemente für den Fahrer verfügt und somit auf jeden Fall als vollautomatisiert nach [20] einzustufen ist, da es keine Möglichkeit zur Übersteuerung gibt. Dieses Fahrzeug wird jedoch bisher nicht im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt.

23.2.3 Zusammenfassung

Wie die betrachteten Projekte zeigen, gibt es bisher noch kein durchgängiges Sicherheitskonzept, das alle Anforderungen an eine Automatisierung von Fahrzeugen ohne Sicherheitsfahrer im öffentlichen Straßenverkehr erfüllt. In einigen der Projekte wurden jedoch leistungsfähige Sicherheitsfunktionen gezeigt, die verschiedene Situationen und Ereignisse abdecken. Nimmt man an, dass der sichere Zustand zukünftig entsprechend der „Adopted Regulation of the Department of Motor Vehicles“, Abschnitt 16.2 (d) aus Nevada erreicht werden soll, muss ein autonomes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt der Fahrt in der Lage sein, den fließenden Verkehr zu verlassen und am Straßenrand oder auf einem Seitenstreifen anzuhalten [39]. Dies würde Fahrstreifenwechsel erfordern, die wiederum von einer zuverlässig funktionierenden Umfeldwahrnehmung, Entscheidungsfindung und deren Umsetzung abhängen. Ein einfaches Anhalten, wie es in einigen der Projekte neben der Übergabe an den Sicherheitsfahrer gemacht wird, ist nicht ausreichend. Die Nutzung von einer Kombination aus den vorgestellten Ansätzen zur funktionalen Sicherheit erscheint daher notwendig – wahrscheinlich sind jedoch noch weitere Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen, mit denen eine höhere Zuverlässigkeit erreicht werden kann [39].

23.3 Sicherheitskonzepte aus anderen Disziplinen

Neben autonomen Fahrzeugen und Fahrerassistenzsystemen spielt die funktionale Sicherheit auch in anderen technischen Bereichen eine wichtige Rolle. Im Folgenden werden daher Sicherheitskonzepte aus weiteren Disziplinen vorgestellt und deren Anwendbarkeit auf autonome Fahrzeuge untersucht.

23.3.1 Schienenfahrzeuge

Schienenfahrzeuge werden bereits seit einigen Jahren automatisch betrieben. Im Personenverkehr ist dabei meist ein Zugführer vorhanden, der eine überwachende Aufgabe über-

nimmt [66]. Im Gegensatz zu den hier betrachteten autonomen Fahrzeugen werden Sicherheitsfunktionen häufig in die Infrastruktur integriert, beispielsweise werden Gleisbelegungen in Steuerzentralen koordiniert, und die überwachenden Komponenten sind in die Gleise integriert. Die Steuerungssysteme haben die Aufgabe, Streckenabschnitte immer nur mit einem Zug zu belegen, um Kollisionen zu vermeiden. Dies wird durch im Gleis verbaute Sensoren und Systeme (*waysidecentric*) wie z. B. Achszähler am Eingang und am Ausgang eines Streckenabschnitts realisiert [42]. Ist ein Abschnitt belegt, so werden die Signale entsprechend geschaltet, um eine Einfahrt zu verhindern. Die Kollisionsvermeidung ist daher vorrangig ein logistisches Problem, speziell der Verkehrsbetriebstechnologie. Die mechanische Querführung ohne Freiheitsgrad bei Schienenfahrzeugen reduziert die Komplexität der Situationen und Handlungsoptionen. Vereinfacht gesagt kommt es nur darauf an, dass Züge auf freien Gleissegmenten mit angemessener Geschwindigkeit fahren, um ein Entgleisen zu verhindern. Eine Überwachung der Strecke vor dem Zug ist aufgrund der langen Anhaltewege nicht mit Umfeldsensorik möglich. Dennoch verfügen Züge und Bahnen über Nothaltefunktionen, die von den Passagieren und dem Zugführer an Bord und in fahrerlosen Bahnen auch von extern ausgelöst werden können.

In fahrerlosen Zügen und Bahnen wird die Geschwindigkeit der Fahrt automatisch geregelt, und neben der Überwachung der Gleisbelegung durch die Infrastruktur verfügen die Systeme auch über Onboard-Mechanismen (*vehiclecentric*). Die Kommunikation zwischen Steuerzentrale und Fahrzeug erfolgt über Funktechnologien, genauso wie die Kommunikation zwischen Bahnsteigen und fahrerlosen U-Bahnen. Dadurch kann eine redundante Türüberwachung am Bahnsteig und in der Bahn genutzt werden, um Gefährdungen durch sich schließende Türen zu verhindern. Das *Communication Based Train Control* (CBTC) hat sich zu einem Standard entwickelt, der in zahlreichen Bahnsystemen weltweit eingesetzt wird [42].

In der Nürnberger U-Bahn RUBIN wird ein solches System zur automatisierten Zugführung eingesetzt. Auf den Bahnstrecken gibt es einen gemischten Verkehr von Bahnen mit und ohne Fahrer. Ein wesentlicher Bestandteil des Sicherheitskonzepts ist die Überwachung der Türen [38]. Hier werden Komponenten der automatischen Zugschutzsysteme (*Automatic Train Protection* (ATP)) und des automatischen Zugbetriebs (*Automatic Train Operation* (ATO)) eingesetzt, die in stationäre und Onboard-Komponenten unterteilt werden. Mit ATP wird die Geschwindigkeit unterhalb existierender Begrenzungen gehalten, und es werden Sicherheitsstopps und Nothalte ausgelöst. Das System muss daher die Anforderungen an das Sicherheitsintegritätslevel 4 (höchste Sicherheit) nach der europäischen Norm IEC 50128:2011 erfüllen [29]. Die dafür notwendige Hard- und Software ist in Relation zu den hohen Kosten von Schienenfahrzeugen im Vergleich zu Kraftfahrzeugen relativ günstig.

23.3.2 Rein elektrische Ansteuerung von Aktoren (X-by-Wire)

Bei autonomen Fahrzeugen erfolgt die Ansteuerung der Aktoren über elektrische Signale. Gas, Bremse, Lenkung und Sonderfunktionen werden über Steuergeräte angesteuert. Die-

se X-by-Wire-Technologie ist bisher noch nicht vollständig in Serienfahrzeugen erhältlich. Das elektronische Gaspedal, die elektromechanische Lenkung und das elektrohydraulische Bremssystem gibt es zwar schon seit einigen Jahren. Jedoch verfügen Lenkung und Bremse immer noch über einen mechanischen/hydraulischen Durchgriff, zumeist permanent und in eher seltenen Fällen als Rückfallebene, falls das elektrische System ausfällt.¹ Der Fahrer kann das Fahrzeug dadurch auch ohne Elektronik kontrollieren.

Für autonome Fahrzeuge muss die Aktorik daher mehrfach redundant angesteuert werden, wie das beispielsweise in Flugzeugen erfolgt. Sowohl die Kommunikationssysteme zwischen Bedienelementen, Steuergeräten und Aktoren als auch die Bedienelemente, Steuergeräte und Aktoren (inklusive der Energieversorgung) selbst werden hier mehrfach verbaut, sodass im Fehlerfall auf die redundanten Systeme zurückgegriffen werden kann [3]. In [67] wird ein dreifach-redundantes Steuerungssystem für ein Boeing 777-Passagierflugzeug vorgestellt. Jede sicherheitsrelevante Komponente des Flugzeugkontrollsystems wird auf drei unterschiedliche Arten redundant umgesetzt, um eine hohe Verfügbarkeit der Ansteuerung durch einen Piloten oder den Autopiloten zu realisieren. Aufgrund der Kritikalität der Flugzeugführung sind in Passagierflugzeugen neben dem Autopiloten zwei menschliche Piloten an Bord vorgeschrieben [15].

Die in Flugzeugen eingesetzten Architekturmuster und auch die Hard- und Software zur Realisierung erscheinen auch für Fahrzeuge technisch anwendbar. In Flugzeugen spielen die hohen Kosten solcher redundanter Systeme aufgrund der hohen Gesamtkosten des Flugzeugs selbst nur eine geringe Rolle. Für Fahrzeuge wären bei einer analogen Anwendung von dreifacher Redundanz jedoch der dreifache Entwicklungsaufwand und die dreifache Hardware im Vergleich zu heutigen Systemen im Fahrzeug erforderlich. Es bleibt allerdings offen, ob in Fahrzeugen tatsächlich eine dreifache Redundanz der Systeme erforderlich wäre.

Im Flugverkehr werden die Flugrouten durch eine zentrale Luftverkehrskontrolle vorgegeben, und die Autopiloten halten die Flugzeuge auf den vorgegebenen Kursen. Ein Autopilot im Flugzeug lässt sich mit einem teilautomatisierten Fahrerassistenzsystem vergleichen, da die Piloten die Aufgabe haben, das System zu überwachen. In unbemannten Flugzeugen entfällt diese Überwachung durch Piloten, und die Anforderungen an das Flugzeugführungssystem steigen. Durch Flugrouten, die nur über dünnbesiedelte Gebiete gelegt werden, sollen Risiken reduziert werden. Da keine Personen an Bord sind, ist ein Absturz im freien Feld durchaus möglich, da niemand dabei verletzt wird [34].

23.3.3 Robotik

Mobile Roboter können sich selbst und ihre Umgebung durch Kollisionen mit Objekten, Personen und weiteren Lebewesen und durch Übersehen von Absätzen, Abgründen, Stufen

¹ Der Fahrzeughersteller Nissan hat 2012 eine Lenkung vorgestellt, die im Fehlerfall eine mechanische Verbindung über eine Kupplung herstellt.

etc. gefährden [1], [10], [18]. Automatisierte Manipulatoren, die entweder stationär oder auf mobilen Plattformen eingesetzt werden, können Menschen gefährden, indem sie ihre Gelenke bewegen und mit den Menschen kollidieren oder durch die Werkzeuge, die sie einsetzen, verletzen. Sowohl für mobile Roboter als auch für Manipulatoren ist der sichere Zustand ein Stopp aller Manipulatoren in der aktuellen Position bzw. ein Anhalten [5]. In den meisten Fällen gilt: Je schneller dies geschieht, umso niedriger ist die Gefährdung, die von dem Roboter für seine Umwelt ausgeht. Ausnahmen sind Werkzeuge und Manipulatoren, wie z. B. Hände und Greifer, die einen Druck ausüben können. Ein Stopp der Aktoren könnte hier einen Druck erhalten, der zu Verletzungen und Beschädigungen führen kann. Wird ein Roboter für komplexere Tätigkeiten eingesetzt, so können daraus Verletzungen und Schäden entstehen, die zwar nicht direkt durch die Bewegung des Roboters verursacht werden, aber durch die Folgen seiner Aktionen. Beispielsweise kann es zu Bränden kommen, wenn ein Bügelroboter abrupt stehen bleibt oder Gefahrgut von einem mobilen Roboter transportiert wird [64].

In [64] und [65] wird eine sicherheitsgetriebene Architektur für Steuerungssysteme von Robotern vorgestellt, die eine Sicherheitsschicht enthält. Diese soll einen Roboter stets in einen sicheren Zustand überführen. Die sicheren Zustände sind abhängig von den Funktionen, die ein Roboter erfüllen soll. Diese können sehr vielfältig sein, und daher wird in [64] und [65] ein Regelsatz (*safety policies*) vorgeschlagen, der übergeordnete Regeln enthält, die einen sicheren Betrieb eines Roboters ermöglichen. Es ist vorstellbar, dass ein Roboter unerwartete Lösungswege für ein Problem abhängig von seiner Entscheidungsfreiheit und seinen grundlegenden Fähigkeiten findet und es dadurch zu gefährlichen Situationen kommen kann. Wie in [9] beschrieben, kann dies bei der häufig angewendeten Subsumptionsarchitektur erfolgen. Übertragen auf autonome Fahrzeuge bedeutet dies, dass zwar Fahrentscheidungen nach verschiedenen Kriterien wie z. B. der Straßenverkehrsordnung, effizienter Fahrweise und Komfort getroffen werden können, aber stets eine Kollisionsvermeidung aktiv wäre, die als übergeordnete Instanz eingreifen könnte.

23.3.4 Kraftwerkstechnik

Kernkraftwerke gelten weithin als besonderes Risiko, da bei Störfällen hohe Schäden für die Umwelt entstehen können. Die dort eingesetzten Steuer- und Regelungssysteme müssen daher die höchsten Sicherheitsanforderungen erfüllen, um einen Betrieb auch nach Naturkatastrophen, terroristischen Anschlägen und internen technischen Fehlern zu ermöglichen. Da bei Kernkraftwerken eine sofortige Abschaltung nicht möglich ist und die Brennelemente auch nach ihrem Einsatz im Reaktor weiterhin aktiv sind und gekühlt werden müssen, sind mehrfach redundante Systeme vor allem zur Kühlung vorgeschrieben.

Die Sicherheit eines Kernkraftwerks hängt maßgeblich davon ab, wie vollständig und fehlerfrei die Steuerungs- und Kontrollsysteme spezifiziert und entwickelt werden. Die

Einbeziehung der Menge der möglichen Situationen und Ereignisse spielt dabei eine wesentliche Rolle, da vor allem Kettenreaktionen und Mehrfachfehler zu einer Gefährdung führen können. Beispielsweise befand sich das Kernkraftwerk Fukushima Daiichi in Fukushima, Japan, nach dem Erdbeben in einem Fail-safe-Zustand und alle Sicherheitssysteme wurden automatisch korrekt aktiviert. Nach dem Auftreffen des Tsunamis wurden jedoch Teile der redundanten Sicherheitssysteme, vor allem der Notstromaggregate, beschädigt. Im Nachhinein betrachtet liegt der Fehler nicht am Versagen der Sicherheitsfunktionen, sondern an der fehlerhaften Spezifikation [63].

Für autonome Fahrzeuge lässt sich daraus folgern, dass die zahlreichen Ereignisse und Kombinationen von Ereignissen und Fehlerquellen bereits bei der Spezifikation berücksichtigt werden müssen. Möglicherweise ist daher eine Standardisierung für die Ermittlung der Anforderungen, vergleichbar mit Kernkraftwerken, notwendig. Bei deren Entwicklung spielt die Sicherheit bereits in der Designphase eine tragende Rolle und steht im Mittelpunkt des Entwicklungsprozesses (*safety by design*, [26]).

23.4 Sichere Zustände in den Use-Cases

Ein wichtiges Kriterium beim Betrieb eines autonomen Fahrzeugs ist, ob sich Passagiere an Bord des autonomen Fahrzeugs befinden oder nicht. So muss beispielsweise bei der Wahl des Abstellorts nicht auf das sicher mögliche Verlassen des Fahrzeugs von Passagieren, wohl aber auf die anderen Verkehrsteilnehmer geachtet werden. Außerdem spielt der Fahrkomfort keine Rolle, wodurch eine andere Fahrweise möglich wird, die den Komfort ignoriert. Sind jedoch Passagiere an Bord, so muss das Fahrzeugführungssystem die Aufgaben eines menschlichen Fahrers übernehmen. Dazu gehört auch die Überwachung der Passagiere, beispielsweise, ob diese angegurtet auf den Passagierplätzen sitzen oder sich riskant verhalten. Es kann immer zu Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern kommen, und so sind Mechanismen der passiven Sicherheit wie z.B. Sicherheitsgurte und Airbags auch in autonomen Fahrzeugen erforderlich. Gleiches gilt für die Sicherung von Ladung, besonders für Gefahrgut.

Im folgenden Abschnitt werden die vier für das Projekt definierten Use-Cases untersucht und jeweils die Eigenschaften des sicheren Zustands herausgearbeitet.

23.4.1 Use-Case 1: Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnпилот

Durch die Beschränkung des Einsatzes auf Autobahnen ist auch die Anzahl der möglichen und wahrscheinlichen Situationen im Vergleich zum städtischen Straßenverkehr geringer. Der Verfügbarkeitsfahrer steht grundsätzlich als Rückfallebene zur Verfügung, und er ist in der Lage, die Kontrolle jederzeit nach eigenem Ermessen zu übernehmen. Das Fahrzeug ist in den folgenden Situationen in einem sicheren Zustand:

1. Das Fahrzeug steht still. Von einem stehenden Fahrzeug geht aktiv keine unmittelbare Gefahr aus (vgl. [6] und [27]). Die Sicherheit für Passagiere und andere Verkehrsteilnehmer hängt jedoch vom Standort des Fahrzeugs ab:
 - *Fahrstreifen auf einer Autobahn*: Aufgrund des Verfügbarkeitsfahrers ist eine manuelle Weiterfahrt mit hoher Wahrscheinlichkeit möglich. Falls eine manuelle Weiterfahrt nicht mehr möglich ist, kann ein stehendes Fahrzeug wie in den Fehlercodes F5 und F6 nach [6] (s. Tab. 23.1) auf einem Fahrstreifen einer Autobahn zu gefährlichen Situationen führen. Einerseits weil das Fahrzeug übersehen oder zu spät gesehen werden könnte, andererseits weil die Passagiere das Fahrzeug eventuell verlassen müssen. Eine weitere Gefährdung kann entstehen, falls das automatisierte Fahrzeug beispielsweise eine Rettungsgasse im Stau blockiert. Ist eine manuelle Fahrt nicht mehr möglich, so obliegt es dem Verfügbarkeitsfahrer, das Fahrzeug entsprechend den geltenden Gesetze abzusichern, z. B. nach § 15 StVO [11].
 - *Seitenstreifen auf einer Autobahn oder Fahrbahnrand einer Autobahn bei fehlendem Seitenstreifen oder Parkplatz, Nothaltebucht oder ähnlicher Standort*: Bleibt ein automatisiertes Fahrzeug auf dem Seitenstreifen einer Autobahn, am Fahrbahnrand oder an einem ähnlichen Standort liegen, kann der Verfügbarkeitsfahrer das Fahrzeug möglicherweise manuell weiterfahren, oder er muss das Fahrzeug entsprechend den geltenden Gesetze absichern (vgl. Fehlercodes F2, F3 und F4 in [6]).
2. Das Fahrzeug fährt auf einem Fahrstreifen mit den vorgeschriebenen oder aufgrund der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs auch größeren Sicherheitsabständen zu anderen Verkehrsteilnehmern und mindestens mit der minimal vorgeschriebenen Geschwindigkeit bzw. höchstens mit der maximal erlaubten oder aufgrund der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs auch maximal möglichen Geschwindigkeit. Das Fahrzeug kennt seine eigene Leistungsfähigkeit und kann daher Systemgrenzen selbstständig erkennen.
3. Das Fahrzeugführungssystem reagiert mit einer Aktion (s. Abschn. 23.5) auf ein Ereignis (s. Abschn. 23.4), um das aktuelle Risiko zu verringern. Dadurch soll ein sicherer Zustand erreicht oder der sichere Zustand erhalten werden – beispielsweise durch eine Übergabe an den Verfügbarkeitsfahrer.

23.4.2 Use-Case 2: Autonomes Valet-Parken

In diesem Use-Case ist die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs nur gering (ca. 30 km/h). Dadurch ist die resultierende Energie, die im Notfall abgebremsst werden muss, deutlich geringer als die üblicherweise erlaubten 50 km/h in deutschen Städten. Eine Übergabe an einen Verfügbarkeitsfahrer ist in diesem Use-Case nicht möglich, da das Fahrzeug fahrerlos betrieben werden kann. Die Sicherheit von Passagieren spielt keine Rolle, da das Fahrzeug ohne Passagiere fährt. Die Fahrtroute muss so geplant werden, dass keine Straßen befahren werden, die das Fahrzeug nicht beherrscht, beispielsweise Straßen mit Bahnübergängen.

In folgenden Situationen ist das Fahrzeug in einem sicheren Betriebszustand:

1. Das Fahrzeug steht still: Der Standort des liegen gebliebenen Fahrzeugs ist relevant, da das Fahrzeug ein gefährliches Hindernis für andere Fahrzeuge sein kann und Rettungsfahrzeuge und Rettungswege blockieren könnte. Die Absicherung des liegengebliebenen Fahrzeugs ist erschwert, da kein Mensch an Bord ist, der dies übernehmen kann. Nur die am Fahrzeug angebrachte Beleuchtung erscheint zur Absicherung nutzbar. In vielen Ländern gibt es spezielle Vorschriften zur Absicherung eines liegen gebliebenen Fahrzeugs, beispielsweise durch ein Warndreieck, das einige Meter hinter dem Fahrzeug aufgestellt werden muss. Es ist schwer vorstellbar, dass dies von einem autonomen Fahrzeug selbstständig erledigt wird. Daraus folgt, dass eine oder mehrere Personen dafür verantwortlich sind. Das Fahrzeug muss also entweder ständig überwacht werden oder von sich aus Hilfe anfordern, falls es zum Anhalten gezwungen ist.
2. Das Fahrzeug fährt auf einem Fahrstreifen, wie in Use-Case 1 beschrieben. Es ist jedoch nicht möglich, an einen Verfügbarkeitsfahrer zu übergeben, da keiner an Bord ist. Eine Möglichkeit besteht, dass das Fahrzeug anhält und so einen sicheren Zustand erreicht. Es ist auch vorstellbar, dass im Fehlerfall während der Fahrt an einen Teleoperator übergeben wird, der das Fahrzeug ferngesteuert an einen sicheren Standort fahren kann.
3. Das Fahrzeug durchfährt eine Kreuzung oder einen Kreisverkehr, oder es biegt ab. Beherrscht das Fahrzeug die Situation und die aktuell geltenden Vorfahrtsregeln, so sind diese Manöver sicher. Erreicht das Fahrzeug dabei seine Systemgrenzen, so kann es mit reduzierter Geschwindigkeit und Signalisierung für die anderen Verkehrsteilnehmer weiterfahren.
4. Das Fahrzeug befindet sich auf einem Parkplatz. Durch die geringen Relativgeschwindigkeiten und den verhältnismäßig geringen Verkehrsfluss sind die Anforderungen hier niedriger und das Betriebsrisiko ist geringer.

Die wesentliche Herausforderung ist der fehlende Verfügbarkeitsfahrer. Bei Ereignissen, die das Risiko erhöhen, kann nicht an den Verfügbarkeitsfahrer übergeben werden, und der Stillstand birgt in vielen Situationen ein hohes Risiko, da das Fahrzeug nicht sofort manuell bewegt werden kann. Eine Lösung könnte das teleoperierte Fahren sein, bei dem eine Kommunikationsverbindung zum Fahrzeug besteht, die zur Meldung eines Problems des Fahrzeugs und zur Fernsteuerung des Fahrzeugs genutzt wird. Ist ein Anhalten erforderlich, so muss dies den anderen Verkehrsteilnehmern entsprechend signalisiert werden. Eine Absicherung des Fahrzeugs durch den Verfügbarkeitsfahrer ist hier nicht möglich.

Das Blockieren von Rettungsfahrzeugen und Rettungswegen auf einstreifigen Straßen und bei Zufahrten für Rettungsfahrzeuge vor Gebäuden und anderen Einrichtungen, wie z. B. öffentliche Plätze, stellt einen Sonderfall dar. Das Blockieren kann dazu führen, dass Rettungsaktionen verzögert und erschwert werden. Dies ist einerseits gesetzlich verboten, andererseits ein wesentlicher ethischer Aspekt. Untersuchungen, die die Häufigkeit solcher Situationen belegen, sind dem Autor nicht bekannt. Daher kann hier keine Aussage getrof-

fen werden, ob dieser Fall explizit berücksichtigt werden muss oder nicht. Nicht automatisierte Fahrzeuge können zwar ebenfalls liegen bleiben, es ist durch den vorhandenen Fahrer jedoch einfacher, das Fahrzeug schnell und unkompliziert aus dem Weg zu fahren oder zu schieben.

23.4.3 Use-Case 3: Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Sicherheit und Risiko dieses Use-Case sind einer Kombination der Use-Cases 1 und 2 sehr ähnlich. Durch den vorhandenen Verfügbarkeitsfahrer ist es möglich, die Kontrolle an diesen abzugeben. Er kann auch die Absicherung des Fahrzeugs übernehmen, falls dieses liegen bleibt.

Auch die notwendigen Fahrmanöver und die Situationen decken sich mit den Use-Cases 1 und 2. Zusätzlich wird das Fahrzeug auch auf Überlandverbindungen eingesetzt. Die maximale Geschwindigkeit ist in diesem Use-Case auf 240 km/h beschränkt. Dadurch sind praktisch alle Geschwindigkeiten denkbar, jedoch muss die Maximalgeschwindigkeit immer so gewählt werden, dass diese innerhalb der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugführungssystems liegt und das Risiko entsprechend reduziert ist.

Für den sicheren Zustand gelten die gleichen Bedingungen wie in den Use-Cases 1 und 2.

23.4.4 Use-Case 4: Vehicle-on-Demand

(Sicherheits-)Technisch ist dieser Use-Case der anspruchsvollste. Das Fahrzeug muss mit allen Situationen zurechtkommen, mit denen auch ein Mensch zurechtkommen muss. Das Risiko muss stets unterhalb einer für Passagiere und andere Verkehrsteilnehmer zumutbaren Schwelle liegen. Sowohl die Fahrmanöver als auch die Bedingungen für den sicheren Zustand können unter Berücksichtigung des fehlenden Verfügbarkeitsfahrers aus den Use-Cases 1, 2 und 3 übernommen werden.

Das Fahrzeug befindet sich unter den folgenden Bedingungen in einem sicheren Zustand:

1. Das Fahrzeug steht still wie in den Use-Cases 1, 2 und 3. In jeder Situation ist das Fahrzeug auf Hilfe von außen angewiesen. Neben möglichen Passagieren sind weitere Personen involviert, die über den Zustand des Fahrzeugs informiert sein und auf Probleme des Fahrzeugs reagieren müssen.
2. Das Fahrzeug fährt auf einem Fahrstreifen wie in den Use-Cases 1, 2 und 3. Aus der Fahrt heraus muss bei einem risikoerhöhenden Ereignis selbstständig ein sicherer Zustand erhalten bzw. erreicht werden.

Durch die Verfügbarkeit auf Abruf und die universelle Nutzbarkeit muss das Vehicle-on-Demand mit allen Situationen im Straßenverkehr zurechtkommen. Die sicherheitsrelevan-

ten Ereignisse, die eine Reaktion des Fahrzeugs erfordern, werden in Abschn. 23.5 näher beschrieben.

23.4.5 Zusammenfassung

Die Betrachtung der vier Use-Cases hat ergeben, dass die größten Herausforderungen für den sicheren Zustand durch hohe Relativgeschwindigkeiten, das Fehlen eines Verfügbarkeitsfahrers und das Blockieren von Rettungsfahrzeugen und -wegen entstehen. Aus ihrer Betrachtung lassen sich folgende Sicherheitsanforderungen an das Fahrzeug ableiten:

- Ein autonomes Fahrzeug muss seine eigene aktuelle Leistungsfähigkeit kennen.
- Ein autonomes Fahrzeug muss seine eigenen aktuellen funktionalen Grenzen abhängig von der aktuellen Situation kennen.
- Ein autonomes Fahrzeug muss stets in einem Zustand betrieben werden, in dem das Risiko für Passagiere und weitere Verkehrsteilnehmer zumutbar ist.
- Ein Fahrzeug, das auf einem Seitenstreifen oder am Fahrbahnrand steht und den Verkehr nicht blockiert, ist in einem sicheren Zustand.
- Ein Fahrzeug, das auf einem Fahrstreifen steht, ist nur in einem sicheren Zustand, falls alle folgenden Bedingungen zutreffen:
 - Die Relativgeschwindigkeit zu weiteren Verkehrsteilnehmern ist unterhalb eines noch zu definierenden Maximums.
 - Das stehende Fahrzeug blockiert keine Rettungsfahrzeuge oder Rettungswege.
 - Ein Verfügbarkeitsfahrer oder ein Teleoperator kann das Fahrzeug in kurzer Zeit von diesem Standort entfernen.
 - Ein Verfügbarkeitsfahrer kann das Fahrzeug absichern.
- Ein Fahrzeug, das sich mit hohem Risiko bewegt oder an einer gefährlichen Stelle stehen geblieben ist, muss einen Notruf absetzen und Hilfe anfordern können.

23.5 Sicherheitsrelevante Ereignisse

Im Straßenverkehr können verschiedene Ereignisse auftreten, die das Risiko in der aktuellen Situation und in der zukünftigen Entwicklung der Situation beeinflussen. Einerseits verringern technische Defekte und Fehler im Fahrzeugführungssystem die eigene Leistungsfähigkeit, andererseits erhöhen Veränderungen der Umweltbedingungen, Situationen, die das Fahrzeugführungssystem überfordern, fehlerhaftes Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer und Ereignisse der höheren Gewalt die Anforderungen an das Fahrzeugführungssystem. Besonders eine Kombination aus reduzierten Fähigkeiten und erhöhten Anforderungen führt zu einem größeren Risiko.

Defekte und technische Fehler am Fahrzeug und am Fahrzeugführungssystem können unvermittelt auftreten und sind daher schwer vorherzusehen. Neben mechanischen Defek-

ten am Fahrzeug können Defekte und Entwicklungsfehler im Fahrzeugführungssystem zu einer verringerten Leistungsfähigkeit führen (vgl. [16]). Ungünstige Licht- und Wetterverhältnisse erhöhen die Anforderungen an die Robustheit der eingesetzten Sensorik zur Umfeldwahrnehmung. Außerdem führen ungünstige Wetterbedingungen zu schlechteren Straßenverhältnissen. Diese wirken sich direkt auf die Fahrdynamik aus. Aufgrund der Komplexität des Straßenverkehrs und der offenen Menge an möglichen Situationen ist es wahrscheinlich, dass bei der Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems nicht alle Situationen berücksichtigt werden können. Gerät das Fahrzeug in eine Situation, die mit der bestehenden Software nicht gelöst werden kann, hat dies einen direkten Einfluss auf das Risiko.

Eine große Herausforderung ist das Erkennen der eigenen Leistungsfähigkeit und der Systemgrenzen in solchen Situationen. Das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer ist nicht immer regelkonform, und so kann es vorkommen, dass sich diese gefährdend verhalten. In manchen Situationen könnte der Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs nicht sicher sein, weil sich andere Verkehrsteilnehmer gefährlich verhalten. Denkbar ist sogar, dass dies mutwillig geschieht, falls das automatisierte Fahrzeug als solches erkannt wird. Auch durch höhere Gewalt kann das Risiko des Betriebs zunehmen, beispielsweise durch Erdbeben und Flutwellen oder durch Sonnenstürme, die zu einer Störung von genutzten Systemen wie eines globalen Navigationssatellitensystems oder der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation führen [12]. Bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen nach ISO 26262 wurden solche Ereignisse nicht berücksichtigt [30]. Wie dies bei autonomen Fahrzeugen gehandhabt wird, ist bisher noch offen [61].

23.6 Aktionen zur Reduzierung des Risikos

Unter der Annahme, dass ein automatisiertes Fahrzeug stets mit einem zumutbaren Risiko betrieben werden und gleichzeitig einen möglichst hohen Funktionsumfang bereitstellen soll, sind als Reaktion auf sicherheitsrelevante Ereignisse Aktionen auszuführen, die das Risiko auf einen zumutbaren Wert senken oder diesen erhalten und gleichzeitig einen hohen Funktionsumfang ermöglichen. Eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit, eine Erhöhung der Sicherheitsabstände, eine sicherheitsoptimierte Planung von Fahrmanövern, das Verbot bestimmter Fahrmanöver und die Ausführung von Sicherheitsfahrmanövern sind möglich. Das zugrundeliegende Prinzip der funktionalen Degradation (*graceful degradation*) stammt aus der Biologie und wurde beispielsweise in [40] vorgestellt. In [68] wird u. a. ein Überblick über die Anwendungen der funktionalen Degradation in der Luft- und Raumfahrt, der Kraftwerkstechnologie und weiteren Forschungsbereichen gegeben. Treten Fehler in einem System auf oder sind die Ressourcen eingeschränkt, so werden die „lebenswichtigen“ Prozesse erhalten und weniger wichtige Prozesse reduziert oder beendet. Beispielsweise kann bei einem eingeschränkten Sichtfeld die Geschwindigkeit des Fahrzeugs reduziert werden. Unter bestimmten Bedingungen können jedoch auch diese Aktionen nicht zu einer Reduzierung des Risikos auf einen zumutbaren Wert führen, sodass ein An-

halten des Fahrzeugs [25], [46] oder, falls dies ebenso zu riskant ist, ein Verlassen des Straßenverkehrs notwendig werden.

Bei der funktionalen Degradation ist es nicht nur notwendig, einen sicheren Zustand zu erreichen bzw. zu erhalten, sondern auch die Leistungsfähigkeit zu erhöhen, indem Mechanismen zur Selbstheilung und Rekonfiguration angewendet werden. In technischen Systemen ist der Neustart von Komponenten eine weitverbreitete Aktion zur Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit [22], [44]. Ein Neustart benötigt in der Regel einige Zeit, und es kann je nach Systemstruktur vorkommen, dass ein Neustart einer Komponente auch den Neustart oder zumindest eine erneute Initialisierung anderer Komponenten nach sich zieht. Daher werden sicherheitskritische Komponenten häufig (diversitär) redundant ausgelegt (vgl. [3], [28]).

Neben der Redundanz gibt es auch für einzelne Komponenten Möglichkeiten zur Wiederherstellung der Funktionalität. Für Sensoren und Aktoren bietet sich die Rekalibrierung an, mit deren Hilfe Messwerte bzw. die Umsetzung von Stellwerten abhängig von der aktuellen Situation verbessert werden können. Für das Gesamtsystem können zudem Rekonfigurationsmechanismen genutzt werden, die einen sicheren Betrieb auch nach risikoerhöhenden Ereignissen erlauben [33].

Eine Herausforderung stellt das Erkennen von riskanten Situationen dar. Externe Ereignisse müssen über die Umfeldwahrnehmung erfasst und richtig interpretiert werden. Technische Fehler am Fahrzeug und im Fahrzeugführungssystem müssen jedoch ebenfalls erkannt werden. Ein Fahrer beobachtet Warn- und Kontrollleuchten und nimmt Veränderungen am Fahrzeug, beispielsweise durch technische Defekte, über seine Sinne wahr. In ein autonomes Fahrzeug müssen daher Sensoren und Funktionen integriert werden, die Defekte und Fehler erkennen und anhand ihrer Schwere die aktuelle und zukünftige Leistungsfähigkeit und den möglichen Funktionsumfang ermitteln. Die zu erwartende Komplexität eines Fahrzeugs mit Fahrzeugführungssystem führt zu einer hohen Anzahl an Messwerten. Als Ergebnis wird eine Selbstrepräsentation des Fahrzeugs erstellt, die genutzt wird, um abhängig von der Situation und der Leistungsfähigkeit zu einer Bewertung des aktuellen Risikos zu gelangen. Darauf basieren dann die o.g. Sicherheitsaktionen [46].

23.7 Antizipation von Degradationssituationen

Aufgrund der hohen Dynamik des Straßenverkehrs und der Eigenschaften von elektrischen und elektronischen Systemen können sicherheitsrelevante Ereignisse in Sekundenbruchteilen auftreten und erfordern daher eine schnelle Reaktion des Systems. Besser ist es jedoch, wenn sich Situationen, die ein erhöhtes Risiko aufweisen, vorhersehen lassen oder zumindest bei der Planung von Fahrmanövern berücksichtigt werden. Das *vorausschauende Fahren* des Menschen kann in einem Fahrzeugführungssystem noch umfangreicher implementiert werden, da beispielsweise die Überwachung und Nutzung von zahlreichen Messwerten aus dem Fahrzeug direkt erfolgen.

Die gesammelten Messwerte müssen für eine Vorhersage der Entwicklung der Situation überwacht und gespeichert werden. Anhand von umfangreichen Datenanalysen könnten sich anbahnende Fehler erkannt werden. Bereits eine Erkennung von Schwierigkeiten einige Zehntelsekunden vor einem Ereignis kann zu einer sichereren Reaktion führen. Ein notwendiges Bremsmanöver, das beispielsweise 0,3 Sekunden eher erkannt und ausgelöst wird, kann den Anhalteweg bei einer Fahrt mit 50 km/h um 4,2 Meter verkürzen.

Weiteres Potenzial zur Erhöhung der Sicherheit liefern Kommunikationsmöglichkeiten mit der Infrastruktur und weiteren Fahrzeugen. Je eher Informationen über Gefahren vorliegen, umso eher kann auf diese reagiert werden, beispielsweise bei Straßenschäden, Verschmutzung und Glätte, bei vorausliegenden Stauenden oder bei Notbremsmanövern von vorausfahrenden Fahrzeugen.

23.8 Dilemma-Situationen

In manchen Fällen kann eine Verkettung von Ereignissen zu einer Situation führen, die nicht ohne Personenschaden lösbar ist. Ein automatisiertes Fahrzeug muss in diesen Dilemma-Situationen innerhalb kürzester Zeit eine mögliche Handlungsoption auswählen, die zwar zu einem Personenschaden führt, jedoch den minimalen Schaden hervorruft. Mögliche Sachschäden und Verstöße gegen geltende Gesetze sind dabei ebenfalls denkbar, haben aber eine geringere Priorität. Die Anzahl der eigenen Passagiere und die Art und Dynamik der anderen Verkehrsteilnehmer müssen unter möglichen Unsicherheiten berücksichtigt werden. Die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern ist hier besonders wichtig und kann helfen, solche Situationen mit dem minimalen Personenschaden zu lösen.² Eine detaillierte ethische Diskussion zu Dilemma-Situationen findet sich in Kap. 4 dieses Buches. Im Folgenden werden daher nur technische Aspekte betrachtet.

Abbildung 23.1 zeigt zwei Situationen. Die erste ist kollisionsfrei lösbar. Die zweite kann zu einem Dilemma führen. Zu Beginn der ersten Situation fährt das Fahrzeug auf einem Fahrstreifen, und am Straßenrand sind weitere Fahrzeuge geparkt. Zwischen diesen tritt unerwartet und schwer zu erkennen eine Person auf den Fahrstreifen. Es gibt nun mehrere Möglichkeiten, wie das Fahrzeug reagieren kann, um eine Kollision mit dem Fußgänger zu vermeiden. In Option 1 kann das Fahrzeug bremsen und vor dem Fußgänger anhalten. In Option 2 kann das Fahrzeug auf den Nachbar-Fahrstreifen ausweichen und eine Kollision verhindern. Dabei ist ein Überfahren der durchgehenden Linie zwischen den Fahrstreifen erforderlich. Dies ist ein Verstoß gegen die StVO.

In der zweiten Situation fährt ein entgegenkommendes Fahrzeug auf dem zweiten Fahrstreifen. Nimmt man an, dass ein Bremsmanöver nicht mehr zu einer Verhinderung der Kollision mit dem Fußgänger führt, befindet sich das autonome Fahrzeug in einem Dilemma:

² Das DFG-Schwerpunktprogramm „Kooperativ interagierende Fahrzeuge“ wird dieses Thema in den nächsten Jahren ebenfalls untersuchen.

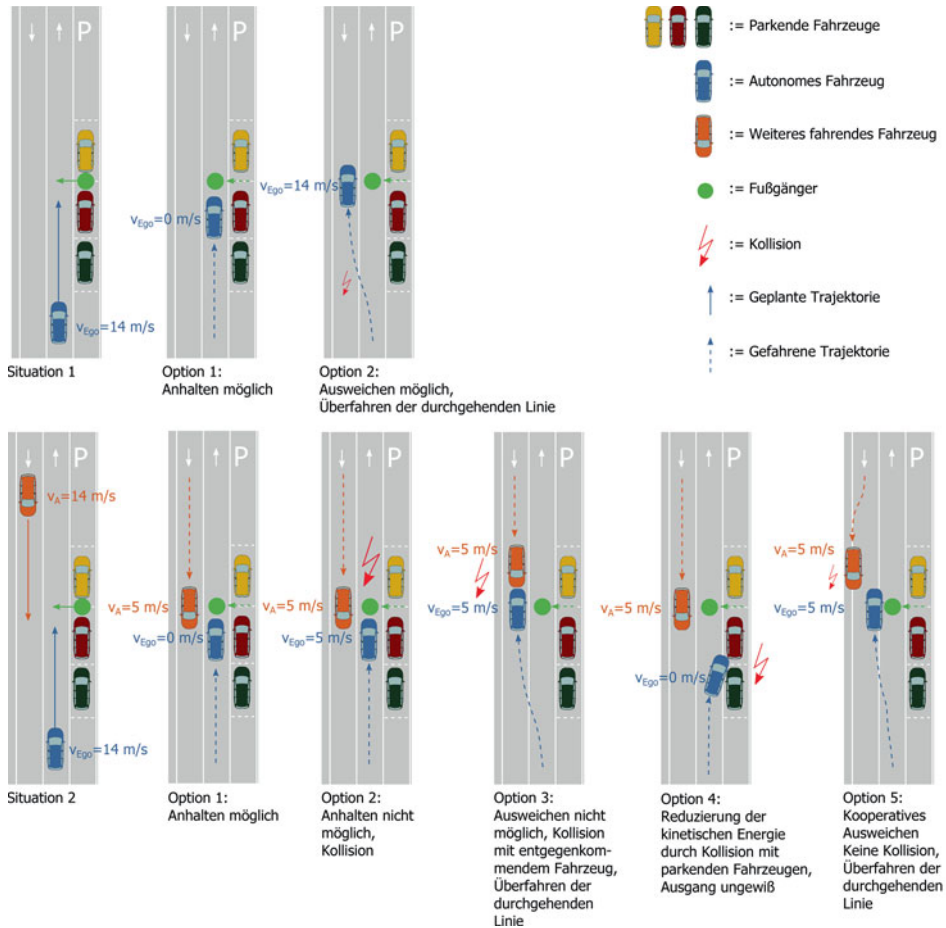


Abb. 23.1 Zwei Situationen, die zu einem Dilemma führen können

Mit dem Fußgänger zu kollidieren, kann schwere Verletzungen bei diesem hervorrufen (Option 2). Ausweichen auf den Nachbar-Fahrbahnstreifen führt zu einer Kollision mit dem entgegenkommenden Fahrzeug, und möglicherweise kann dadurch auch der Fußgänger verletzt werden (Option 3). Eine Kollision mit den parkenden Fahrzeugen zur Reduzierung der eigenen Geschwindigkeit ist ebenfalls denkbar (Option 4), jedoch ist die Unsicherheit, ob dadurch der Fußgänger verschont bleibt, sehr groß. Für solche Situationen ist daher auch die Implementierung von ethischen Grundsätzen in der Software zur Entscheidungsfindung innerhalb des Fahrzeugführungssystems erforderlich.

Eine Lösung zumindest dieses Problems könnte die Anwendung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zwischen dem autonomen und dem entgegenkommenden Fahrzeug sein. Die beiden Fahrzeuge könnten gemeinsam eine Lösung finden, die dazu führt, dass das entgegenkommende Fahrzeug an den Fahrbahnrand ausweicht und das autonome

Fahrzeug zwischen entgegenkommendem Fahrzeug und Fußgänger kollisionsfrei passieren kann (Option 5). Beide Fahrzeuge würden dabei gegen die StVO verstoßen, da beide eine durchgehende Linie überfahren müssen.

Dennoch muss auch der Betrieb ohne Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur möglich sein, da es unwahrscheinlich ist, dass diese Kommunikationsmöglichkeiten flächendeckend und mit allen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung stehen.

Die Fahrzeugführung muss daher auf der bordeigenen Sensorik möglich sein. Dieser *bordautonome Betrieb* (vgl. [36]) stellt einerseits die höchsten Anforderungen an das Fahrzeugführungssystem, andererseits aktuell die einzige Möglichkeit zu einem Einsatz im Straßenverkehr dar. Dies schränkt besonders die Möglichkeiten in gefährlichen Situationen und Dilemma-Situationen ein und erhöht die Unsicherheit bei der Wahrnehmung von Situationen. Auch die Signalisierung anderer Verkehrsteilnehmer ist nur durch optische und akustische Signale möglich.

23.9 Zusammenfassung

Bei den aktuellen Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und in verwandten Entwicklungs- und Forschungsbereichen gibt es eine Vielzahl von Methoden, die auch bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge eingesetzt werden können und möglicherweise müssen. Aufgrund der Vielfalt der Technologien greifen diese an verschiedenen Stellen im Entwicklungsprozess und im zu entwickelnden System an und können zur Sicherheit autonomer Fahrzeuge beitragen.

Zunächst muss eine Metrik gefunden werden, mit der das Betriebsrisiko von autonomen Fahrzeugen bewertet werden kann, und dann muss eine allgemein zumutbare Schwelle definiert werden. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Sicherheitsanforderungen und der Integration der funktionalen Sicherheit in das Gesamtsystem aus der Kraftwerksentwicklung kann dabei hilfreich sein.

Bei der funktionalen Sicherheit der Regelung und Aktorik können Vorbilder in der Luft- und Raumfahrt, teilweise im Bahnbereich und in der aktuellen Forschung und Entwicklung der Fahrzeugtechnik angewendet werden. Mehrfache, diversitäre funktionale Redundanz ist eines der erfolgversprechenden Mittel. Gleiches gilt auch für die Softwarekomponenten in der Situationsanalyse, Entscheidungsfindung und Bewegungsplanung, wobei bisher nur in der Robotik ähnlich komplexe Situationen beherrscht werden müssen. Das Risiko dort ist jedoch meist geringer.

Eine der größten Herausforderungen liegt in der Zuverlässigkeit und Verlässlichkeit der Umfeldwahrnehmung, die auch die Selbstwahrnehmung und Situationswahrnehmung mit einschließt. Aufgrund der offenen Menge an möglichen Situationen ist es nach Kenntnisstand des Autors bisher nicht gelungen, komplexe Anwendungen, wie in den Use-Cases beschrieben, sicher umzusetzen. Auch hier sind Hardware- und Softwareredundanz sowie funktionale Redundanz notwendig, beispielsweise bei der Zusammensetzung der das Umfeld wahrnehmenden Sensoren.

In den Forschungsprojekten zu autonomen Fahrzeugen ist weiterhin ein Sicherheitsfahrer notwendig, der das System überwacht – zum einen durch direkte Eingriffe, zum anderen durch Notstoppfunktionen per Funk oder durch Not/Aus-Schalter. Die betrachteten Forschungsprojekte fokussieren sich derzeit noch stark auf die Funktionen und weniger auf deren funktionale Sicherheit.

Die Sicherheit autonomer Fahrzeuge ist eine der wesentlichen Herausforderungen in der zukünftigen Forschung. Für die Entwicklung der Technologie sind aber nicht nur technische, sondern auch juristische und gesellschaftliche Probleme zu lösen.

Literatur

1. Albers, A., Brudniok, S., Otnad, J., Sauter, C., Sedchaicharn, K. (2006). Upper Body of a new Humanoid Robot – the Design of ARMAR III. 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, S 308–313. Genua, Italien
2. Basarke, C., Berger, C., Rumpe, B. (2007). Software & Systems Engineering Process and Tools for the Development of Autonomous Driving Intelligence. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication (JACIC)*, 4(12), S 1158–1174
3. Bergmiller, P., Maurer, M., Lichte, B. (2011). Probabilistic fault detection and handling algorithm for testing stability control systems with a drive-by-wire vehicle. 2011 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC), S 601–606. Denver, CO, USA
4. Bertozzi, M., Broggi, A., Coati, A., Fedriga, R. I. (2013). A 13,000 km Intercontinental Trip with Driverless Vehicles: The VIAC Experiment. *Intelligent Transportation Systems Magazine*, 5(1), S 28–41
5. Bicchi, A., Peshkin, M. A., Colgate, J. E. (2008). Safety for Physical Human-Robot Interaction. In B. Siciliano, O. Khatib (Hrsg), *Springer Handbook of Robotics*, S 1335–1346. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
6. Binfet-Kull, M., Heitmann, P., Ameling, C. (1998). System safety for an autonomous vehicle. 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Stuttgart, Deutschland
7. Broggi, A., Bertozzi, M., Fascioli, A. (1999). ARGO and the MilleMiglia in Automatico Tour. *Intelligent Systems and their Applications*, 14(1), S 55–64
8. Broggi, A., Buzzoni, M., Debattisti, S., Grisleri, P., Laghi, M. C., Medici, P., Versari, P. (2013). Extensive Tests of Autonomous Driving Technologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(3), S 1403–1415
9. Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(1), S 14–23
10. Bubeck, A., Weisshardt, F., Sing, T., Reiser, U., Hägele, M., Verl, A. (2012). Implementing best practices for systems integration and distributed software development in service robotics – the Care-O-bot® robot family. IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), S 609–614. Fukuoka, Japan
11. Bundesministerium der Justiz, für Verbraucherschutz. (2013). *Straßenverkehrs-Ordnung*. Bonn, Deutschland
12. Carrano, C. S., Bridgwood, C. T., Groves, K. M. (2009). Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS. *Radio Science*, 44 (RS0A25)
13. Chatham, A. (2013). Google's Self Driving Cars: The Technology, Capabilities, Challenges. *Embedded Linux Conference*. San Francisco, CA, USA
14. Dickmanns, E. D. (2002). The development of machine vision for road vehicles in the last decade. 2002 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Dearborn, MI, USA

15. EASA. (2013). EASA LIST OF CLASS OR TYPE RATINGS AEROPLANES. Köln, Deutschland
16. Echtle, K. (1990). Fehlertoleranzverfahren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
17. Fenton, R. (1970). Automatic vehicle guidance and control – A state of the art survey. *Transactions on Vehicular Technology*, 19(1), S 153–161
18. Fischer, H., Voges, U. (2011). Medizinische Robotersysteme. In R. Kramme (Hrsg), *Medizintechnik*, S 915–926. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
19. Ganek, A., Corbi, T. (2003). The Dawning of the Autonomic Computing Era. *IBM Syst. J.*, 42(1), S 5–18
20. Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W. (2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung : gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft
21. Geyer, S. (2013). Entwicklung, Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, VDI Reihe 12 Band 770
22. Ghosh, D., Sharman, R., Raghav Rao, H., Upadhyaya, S. (2007). Self-healing systems – survey and synthesis. *Decision Support Systems in Emerging Economies*, 42(4), S 2164–2185
23. Grisleri, P., Fedriga, I. (2010). The Braive Autonomous Ground Vehicle Platform. IFAC Symposium on intelligent autonomous vehicles, 7. Lecce, Italien
24. Hörwick, M. (2011). Sicherheitskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme. Dissertation, Technische Universität München
25. Hörwick, M., Siedersberger, K.-H. (2010). Strategy and architecture of a safety concept for fully automatic and autonomous driving assistance systems. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S 955–960. San Diego, CA, USA
26. IAEA. (2012). *Safety of Nuclear Power Plants: Design – Specific Safety Requirements No. SSR-2/1*. Wien, Österreich
27. Isermann, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
28. Isermann, R., Schwarz, R., Stölzl, S. (2002). Fault-tolerant drive-by-wire systems. *IEEE Control Systems*, 22(5), S 64–81
29. ISO. (2011). EN 50128:2011 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems. Genf, Schweiz
30. ISO. (2011). ISO 26262:2011 Road vehicles – Functional safety. Genf, Schweiz
31. Kammel, S., Ziegler, J., Pitzer, B., Werling, M., Gindele, T., Jagzent, D., Schröder, J., Thuy, M., Goebel, M., von Hundelshausen, F., Pink, O., Frese, C., Stiller, C. (2008). Team AnnieWAY's autonomous system for the 2007 DARPA Urban Challenge. *Journal of Field Robotics*, 25(9), S 615–639
32. Kämpchen, N., Waldmann, P., Homm, F., Ardelt, M. (2010). *Umfelderfassung für den Nothalteassistenten – ein System zum automatischen Anhalten bei plötzlich reduzierter Fahrfähigkeit des Fahrers*. AAET 2010, Braunschweig, Deutschland
33. Kim, J., Rajkumar, R., Jochim, M. (2013). Towards Dependable Autonomous Driving Vehicles: A System-level Approach. *SIGBED*, 10(1), S 29–32
34. Korn, B., Tittel, S., Edinger, C. (2012). Stepwise integration of UAS in non-segregated airspace-The potential of tailored uas atm procedures. *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, S 1–8. Herndon, VA, USA
35. Levinson, J., Askeland, J., Becker, J., Dolson, J., Held, D., Kammel, Kolter, J. Z., Langer, D., Pink, O., Pratt, V., Sokolsky, M., Stanek, G., Stavens, D., Teichman, A., Werling, M., Thrun, S. (2011). Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S 163–168. Baden-Baden, Deutschland

36. Maurer, M. (2000). Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen. VDI-Verlag
37. Mirwaldt, P., Bartels, A., Lemmer, K. (2012). Gestaltung eines Notfallassistentensystems bei medizinisch bedingter Fahrunfähigkeit. 5. Tagung Fahrerassistenz. München, Deutschland
38. Müller, R. (2003). Das Projekt RUBIN – Automatische U-Bahnen ab 2006 in Nürnberg: Mehr Service, niedrigere Kosten im Nahverkehr. 19th Dresden Conference on Traffic and Transportation Science. Dresden, Deutschland
39. NDMV. (2012). Adopted Regulation of the Department of Motor Vehicles LCB File No. R084-11. Carson City, NV, USA
40. Norman, D. A., Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7(1), S 44–64
41. Nothdurft, T., Hecker, P., Ohl, S., Saust, F., Maurer, M., Reschka, A., Böhmer, J. R. (2011). Stadtpilot: First fully autonomous test drives in urban traffic. 2011 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), S 919–924. Washington DC, USA
42. Pascoe, R. D., Eichorn, T. N. (2009). What is communication-based train control? *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 4(4), S 16–21
43. Pellkofer, M. (2003). Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
44. Psailer, H., Sustdar, S. (2011). A survey on self-healing systems: approaches and systems. *Computing*, 91(1), S 43–73
45. Rauch, S., Aeberhard, M., Ardelt, M., Kämpchen, N. (2012). Autonomes Fahren auf der Autobahn – eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. 5. Tagung Fahrerassistenz. München, Deutschland
46. Reschka, A., Böhmer, J. R., Nothdurft, T., Hecker, P., Lichte, B., Maurer, M. (2012). A Surveillance and Safety System based on Performance Criteria and Functional Degradation for an Autonomous Vehicle. 2012 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), S 237–242. Anchorage, AK, USA
47. Reschka, A., Böhmer, J. R., Saust, F., Lichte, B., Maurer, M. (2012). Safe, Dynamic and Comfortable Longitudinal Control for an Autonomous Vehicle. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S 346–351. Alcalá des Henares, Spanien
48. SAE International. (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (J3016). SAE International
49. Schopper, M., Henle, L., Wohland, T. (2013). Intelligent Drive – Vernetzte Intelligenz für mehr Sicherheit. *ATZextra*, 18(5), S 106–114.
50. Shladover, S. (2007). PATH at 20 – History and Major Milestones. *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(4), S 584–592
51. Singh, S. (2008). Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part I (Vol. 25). Wiley Subscription Services, Inc.
52. Singh, S. (2008). Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part II (Vol. 25). Wiley Subscription Services, Inc.
53. Singh, S. (2008). Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part III (Vol. 25). Wiley Subscription Services, Inc.
54. Stanek, G., Langer, D., Müller-Bessler, B., Huhnke, B. (2010). Junior 3: A test platform for Advanced Driver Assistance Systems. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S 143–149. San Diego, CA, USA
55. Stiller, C., Färber, G., Kammel, S. (2007). Cooperative Cognitive Automobiles. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Istanbul, Türkei
56. Thorpe, C., Jochem, T., Pomerleau, D. (1997). The 1997 automated highway free agent demonstration. 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Boston, MA, USA

57. Thuy, M., Goebel, M., Rattei, F., Althoff, M., Obermeier, F., Hawe, S., Nagel, R., Kraus, S., Wang, C., Hecker, F., Russ, M., Schweitzer, M., Leon, F.P., Färber, G., Buss, M., Diepold, K., Eberspächer, J., Heißing, B., Wünsche, H.-J. (2008). Kognitive Automobile – Neue Konzepte und Ideen des Sonderforschungsbereichs/TR28. 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Garching b. München, Deutschland
58. Tsugawa, S. (1994). Vision-based vehicles in Japan: machine vision systems and driving control systems. *Transactions on Industrial Electronics*, 41(32), S 398–405
59. Urmson, C. (2012). Realizing Self-Driving Vehicles. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Alcalá des Henares, Spanien
60. Wille, J. M., Saust, F., Maurer, M. (2010). Stadtpilot: Driving autonomously on Braunschweig's inner ring road. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S 506–511. San Diego, CA, USA
61. Winkle, T., Gasser, T. M. (2014). E-Mail Kommunikation
62. Winner, H., Danner, B., Steinle, J. (2009). Adaptive Cruise Control. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S 478–521. Wiesbaden: Vieweg Teubner | GWV Fachverlage GmbH
63. WNA. (2014). Fukushima Accident. Tech. rep., World Nuclear Association
64. Woodman, R., Winfield, A. F., Harper, C., Fraser, M. (2010). Safety control architecture for personal robots: Behavioural suppression with deliberative control. The Seventh IARP Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments. Toulouse, Frankreich
65. Woodman, R., Winfield, A. F., Harper, C., Fraser, M. (2012). Building safer robots: Safety driven control. *The International Journal of Robotics Research*, 31(13), S 1603–1626
66. Yasunobu, S., Miyamoto, S. (1985). Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control. In M. Sugeno (Hrsg), *Industrial Applications of Fuzzy Control*, S 12–29. Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland)
67. Yeh, Y. (1996). Triple-triple redundant 777 primary flight computer. 1996 IEEE Aerospace Applications Conference, S 293–307. Aspen, CO, USA
68. Zhang, Y., Jiang, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 32(2), S 229–252
69. Ziegler, J., Bender, P., Lategahn, H., Schreiber, M., Strauß, T., Stiller, C. (2014). Kartengestütztes automatisiertes Fahren auf der Bertha-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Walting, Deutschland

Kai Rannenberg

Inhaltsverzeichnis

24.1 Einführung: Autos, Freiheit und Datenschutz 516

24.2 Zusätzliche durch autonomes Fahren gesammelte und verarbeitete Daten 517

 24.2.1 Gesammelte und möglicherweise übermittelte
 persönliche Daten in heutigen vernetzten Autos 517

 24.2.2 In autonomen Autos gesammelte persönliche Daten 519

 24.2.3 Konsequenzen von Datenspeicherung für die Kontrolle
 über Daten und Missbrauch 521

 24.2.4 Konsequenzen der Weitergabe von Daten an Dritte 522

24.3 Gibt es bestimmte Arten von Daten, die spezielle Hindernisse hervorrufen? 525

24.4 Anforderungen aus der Perspektive des Datenschutzes 526

 24.4.1 Grundsätze 526

 24.4.2 Weitere Überwachungsmaßnahmen für eine datenschutzverträgliche
 Verwendung der zusätzlichen Daten 530

 24.4.3 Beschränkung von Zugriffsrechten und Einsatz von Verschlüsselung 531

24.5 Architekturüberlegungen 532

24.6 Was muss auf lange Sicht hin bedacht werden? 534

24.7 Fazit 536

Literatur 537

K. Rannenberg (✉)
Goethe-Universität Frankfurt, Deutsche Telekom Chair of Mobile Business and
Multilateral Security, Deutschland
Kai.Rannenberg@m-chair.de

24.1 Einführung: Autos, Freiheit und Datenschutz

Autos sind seit jeher ein Symbol für die Freiheit und Unabhängigkeit ihrer Benutzerinnen und Benutzer, seien es Fahrer oder Mitfahrer. Fahrer können frei entscheiden, wohin sie fahren, welche Strecke sie wählen und meistens auch, wie schnell sie reisen wollen (oder zumindest, wie oft sie eine Pause machen), ohne jemanden über ihre Entscheidungen informieren oder Rechenschaft darüber ablegen zu müssen. Viele Kunstwerke reflektieren diese Möglichkeit der Freiheit und der Flucht vor (häufig unzulässiger oder unangebrachter) Kontrolle, die Autos ihren Benutzern bieten. Eines der wohl eindrucksvollsten Beispiele hierfür sind die Episoden 3, 4, 6 und 7 des 1947 uraufgeführten Filmes „In jenen Tagen“ [1], die die mehr oder weniger erfolgreichen Autofahrten mehrerer Personen zeigen, die zwischen 1933 und 1945 von den Nationalsozialisten in Deutschland unterdrückt bzw. verfolgt wurden. Weitere Beispiele finden sich in Kap. 3. Gleichzeitig bietet ein Auto seinen Fahrern und Haltern eine geschützte Umgebung: Personen außerhalb können für gewöhnlich nicht hören, was innerhalb des Autos gesprochen wird, und sie können sich auch nicht einfach dazugesellen und der Unterhaltung beiwohnen. Auch wenn „My car is my castle“ nicht so populär ist wie „My home is my castle“, sehen viele Leute dennoch ihr Auto als Erweiterung ihres eigenen Heims. Dementsprechend kann man viele Haushaltsgegenstände in Autos vorfinden, und viele Haushaltsaktivitäten finden dort statt ([2], Paragraf 2).

Davon ausgehend könnten autonome Autos einfach eine Erweiterung der traditionellen Konzepte von Freiheit, Autonomie und Privatsphäre für ihre Fahrer und Benutzer darstellen. Jedoch macht „autonomes Fahren“ in erster Linie das Fahren autonom vom Fahrer. Gleichzeitig baut „autonomes Fahren“ stärker auf Interaktionen mit der Außenwelt als ein Auto, das von einem Menschen gefahren wird. Aus der Forschungswelt bekannte autonome Autos tasten ihre Umgebung ab und kommunizieren sogar häufig mit ihr wie z. B. mit anderen Autos in der Nähe. Über den Austausch mit anderen Entitäten in der näheren Umgebung hinaus gibt es Pläne, Autos durch Verkehrszentralen kontrollieren zu lassen, um ihr Verhalten (z. B. die Routenwahl) zu optimieren. Wie jede andere zentrale Einrichtung, die Daten sammelt, verursachen Verkehrszentralen Bedenken bezüglich der Privatsphäre. Dies motiviert dazu, die Datenflüsse und ihre Auswirkungen auf die Privatsphäre zu analysieren. Wenn man in Betracht zieht, dass Autos nicht nur eine große Menge an Daten über ihre Benutzer und ihre Umgebung sammeln, sondern diese auch für eine lange Zeit speichern und schließlich zu anderen Entitäten kommunizieren können, verstärkt dies noch die Notwendigkeit der Analyse.

Deshalb diskutiert dieses Kapitel fünf Leitfragen zu autonomem Fahren, die entsprechenden Datenflüsse sowie die Auswirkung der Interaktion zwischen Fahrzeugen auf die Privatsphäre:

1. Welche „neuen“ oder zusätzlichen Daten werden zur Realisierung des autonomen Fahrens gesammelt und verarbeitet und welche Konsequenzen ergeben sich daraus (Abschn. 24.2)?

2. Gibt es bestimmte Arten von Daten, die spezielle Hindernisse hervorrufen (s. Abschn. 24.3)?
3. Was ist aus der Perspektive des Datenschutzes zu berücksichtigen (Abschn. 24.4)?
4. Was ist bei der Gestaltung von Architekturen zu berücksichtigen, um schwerwiegende oder gar unlösbare Datenschutzprobleme zu vermeiden (Abschn. 24.5)?
5. Was muss auf lange Sicht hin bedacht werden (Abschn. 24.6)?

Diese Fragen werden, so weit wie möglich, anhand der Use-Cases diskutiert, die in Kap. 2 eingeführt wurden. Abschnitt 24.7 schließt dieses Kapitel ab.

24.2 Zusätzliche durch autonomes Fahren gesammelte und verarbeitete Daten

Zur Beurteilung von Chancen und Risiken, die mit der Sammlung und Verarbeitung zusätzlicher Daten verbunden sind, ist es hilfreich, diese Daten zu identifizieren. Dies geschieht entlang der vier Use-Cases (s. Kap. 2). Zuvor wird jedoch ein kurzer Überblick über die Daten gegeben, die bereits in einem nicht-autonom fahrenden Auto gesammelt oder verarbeitet werden können.

24.2.1 Gesammelte und möglicherweise übermittelte persönliche Daten in heutigen vernetzten Autos

Obwohl sich die Analyse in den übrigen Teilen dieses Abschnitts auf „neue“ oder zusätzlich erhobene Daten konzentriert, muss zunächst erwähnt werden, dass auch heutzutage schon viele Arten sensibler persönlicher Daten in Autos gesammelt und übertragen werden. Beispiele hierfür sind:

- Alle Arten von Standort- und Navigationsdaten: Typische Beispiele sind Reiseziele, -zeiten und -gewohnheiten („jedes Wochenende nach Stuttgart“) sowie Vorlieben bei der Routenplanung (landschaftlich schön versus schnell versus umweltfreundlich versus am Rande der Legalität). Insbesondere wenn ein Auto durch Systeme zur Einsatzdisposition, Diebstahlvermeidung, Autoversicherung oder Mautberechnung überwacht wird, werden Informationen über Aufenthaltsorte gesammelt und in vielen Fällen an die entsprechenden zentralen Stellen übertragen. Einige dieser Systeme speichern Daten aufgrund ihrer Sensitivität dezentral, andere hingegen jedoch nicht. Ein Beispiel, das kürzlich sehr bekannt wurde, ist das neue europäische eCall-System [3], [4], [5], das automatisch aktiviert wird, wenn Sensoren im Auto einen schweren Unfall feststellen. Einmal ausgelöst wählt das System automatisch die europäische Notfallnummer 112, baut eine telefonische Verbindung zu einer Notfallzentrale auf und sendet detaillierte Informationen über den Unfall an Rettungsdienste. Die

übertragenen Informationen beinhalten die Uhrzeit des Vorfalls, die genaue Position des verunglückten Fahrzeuges sowie die Fahrtrichtung (wichtig bei Autobahnen und in Tunneln). Durch die Betätigung eines Schalters im Auto kann ein eCall auch manuell ausgelöst werden, z. B. durch Zeugen eines schweren Unfalls.

- Daten zur Fahrdynamik: Daten zur Fahrdynamik wie die Beschleunigung liefern Informationen zum Verhalten des Autos, aber auch zum Verhalten des Fahrers, etwa zu seinem Fahrstil (ruhig versus aggressiv versus schnell versus am Rande der Legalität).
- Daten zum Fahrverhalten: Diese Daten können über die Zeit hinweg aus verschiedenen Lokationsdaten abgeleitet werden. So kann aus dem Vergleich der Lokation eines Autos auf der Autobahn mit der Lokation 15 Minuten zuvor die durchschnittliche Geschwindigkeit des Autos bestimmt werden. Hieraus kann geschlossen werden, ob eine Geschwindigkeitsbegrenzung möglicherweise zeitweise überschritten wurde, in einigen Fällen auch, dass sie überschritten wurde.
- Umgebung: Das Auto sammelt Daten aus der Umgebung, um die Fahrt oder spezielle Verkehrssituationen zu dokumentieren, für den Fall, dass eine solche Dokumentation später als hilfreich erachtet würde. Ein Beispiel hierfür sind Kameras auf dem Armaturenbrett, um aufzuzeichnen und möglicherweise zu übertragen, was vor dem Auto passiert. Daten aus der Umgebung können sehr wohl auch persönliche Daten anderer Personen enthalten, wie z. B. Nummernschilder anderer Fahrzeuge oder die Gesichter von Personen.

Dieser grobe Überblick wirft auch die Frage auf, bei welcher Art von Daten man tatsächlich von persönlichen Daten sprechen kann. Ein Teil der beschriebenen Daten scheint auf den ersten Blick nicht „persönlich“ zu sein. Die Erfahrungen aus mittlerweile mehreren Jahrzehnten von Datenschutzbemühungen zeigen jedoch, dass es keine Garantien gibt, dass Daten nicht auf bestimmte Personen zurückgeführt und missbraucht werden können. Eine Konsequenz dieser Lehre ist, dass „personenbezogene Daten“ (englisch „Personally Identifiable Information“ (PII)) heutzutage nicht nur Informationen sind, die eine Person direkt identifizieren, sondern jede Art von Information, die (a) benutzt werden kann, um die (betroffene) Person zu identifizieren, auf die sich die Daten beziehen, oder (b) möglicherweise direkt oder indirekt auf eine Person hinweisen [[8], Clause 2.9].¹ Die Person (oder der PII-Prinzipal, folgend dem englischen „PII Principal“ [[8], Clause 2.11]) ist dann das Individuum, dessen Daten verarbeitet werden. In unserem Fall sind PII-Prinzipale dann nicht nur Fahrer, Mitfahrer oder Autobesitzer, sondern auch Passanten und andere Fahrzeuge, die erfasst und auf irgendeine mögliche Art und Weise identifiziert werden können.

¹ Die Beziehung zwischen den Begriffen Daten und Informationen ist zu subtil und zu komplex, um sie hinreichend im Rahmen dieses Kapitels zu erläutern, Gleichzeitig sollte es hier ausreichen, Daten und Informationen als annähernd äquivalent zu betrachten. Würde man sich jedoch auf einen der Begriffe beschränken, tun sich Widersprüche mit der referenzierten Literatur auf.

Es gilt weiterhin, dass die praktische Sensitivität von Daten zu einem Zeitpunkt stark vom Kontext abhängig ist. So können z. B. die Standortdaten eines Autos sensibler sein, wenn es in der Nähe des Rotlichtviertels einer Stadt geparkt ist. Weitere Beispiele finden sich in der nachfolgenden Diskussion der Use-Cases des autonomen Fahrens und der Interessen der an den Use-Cases Beteiligten. Zudem hilft die Analyse der Cases, neue Situationen und entsprechende Fragestellungen zu illustrieren.

24.2.2 In autonomen Autos gesammelte persönliche Daten

Dieser Abschnitt diskutiert anhand der vier in Kap. 2 vorgestellten Use-Cases die in autonomen Autos gesammelten Daten.

24.2.2.1 Use-Case 1: Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Der Fahrroboter übernimmt das Fahren, aber nur auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Schnellstraßen. Während der autonomen Fahrt wird der Fahrer zum Passagier, der die Hände vom Lenkrad sowie die Füße von den Pedalen nehmen und anderen Aktivitäten nachgehen kann. Der Fahrroboter koordiniert die sichere Übergabe zum Fahrer und stoppt das Auto an einem möglichst sicheren Ort, wenn nötig.

Neue und zusätzliche Daten, die das Auto in diesem Use-Case sammeln und lernen kann, sind:

- Fähigkeiten des Fahrers, z. B. ob der Fahrer in der Lage ist, die Kontrolle vom Roboter zurück zu übernehmen oder nicht und wie lange die Übergabe dauert. Beide Arten von Daten können von Interesse sein: als aktuelle Daten zur Steuerung von Reaktionen des Autos, aber auch längerfristig als Grundlage für Längsschnittbewertungen.
- Fahrverhalten: Zusätzlich zu Daten über das Fahrverhalten, die bereits heute verfügbar sind, ermöglicht dieser Use-Case auch das Sammeln weiterer Daten, beispielsweise, unter welchen Umständen der Fahrer die Kontrolle abgibt und/oder zurückfordert.
- Umgebung: Es können zusätzliche Daten der Umgebung gesammelt werden, um das autonome Fahren zu ermöglichen. Auch die Dokumentation der Fahrt selbst oder spezifischer Verkehrssituationen kann als hilfreich angesehen werden, um potenzielle Konflikte handhaben zu können. Wie in Abschn. 24.2.1 beschrieben, können Daten der Umgebung auch persönliche Informationen Dritter sein, beispielsweise Nummernschilder oder Gesichter. Daher bestehen Daten der Umgebung aus einer Mischung persönlicher Informationen verschiedener Personen, was sie sehr heikel macht.

Im Rahmen der Diskussion über rechtliche und haftungsbedingte Folgen des autonomen Fahrens (vgl. Teil V dieses Buches, insbesondere die Diskussion durch Gasser Kap. 25) kann angenommen werden, dass ein Interesse darin besteht, Daten zu sammeln, um mögliche Unfälle zu dokumentieren und zu untersuchen, welches Verhalten des Autos, des

Fahrroboters, des Fahrers oder anderer Parteien den Unfall verursacht haben könnte. Dies wäre im Einklang mit anderen Beispielen der Vorgehensweise von Strafverfolgungsbehörden, die ein großes Interesse an Daten haben, die durch die Computerisierung von Aktivitäten zugänglich werden, da computerisierte Aktivitäten meist einfach zu protokollieren sind.

24.2.2.2 Use-Case 2: Autonomes Valet-Parken

Der Fahrroboter stellt das Fahrzeug – nachdem die Insassen es verlassen haben und gegebenenfalls Transportgut ausgeladen wurde – in einer nahen oder auch entfernten Parkposition ab. Anschließend fährt der Fahrroboter das Fahrzeug von der Parkposition wieder zurück bzw. an eine andere gewünschte Adresse oder parkt das Fahrzeug um. Die Fahrer sparen so die Zeit für die Parkplatzsuche, das Abstellen sowie den Fußweg von einem weiter entfernten Parkplatz zum eigentlichen Ziel. Außerdem wird hierdurch der Zugang zum Fahrzeug (räumlich wie zeitlich) erleichtert. Der Parkraum wird durch das autonome Valet-Parken effizienter genutzt und die Parkplatzsuche effizienter gestaltet.

Neue und zusätzliche Daten, die das Auto in diesem Use-Case sammeln und lernen kann, sind:

- Dauer eines Aufenthaltes: Wie viel Zeit verbringen die Nutzer vor Ort?
- Gebiete von Interesse: Wo verbringen Nutzer mehr oder weniger Zeit?
- Fahrt- und Aufenthaltszeiten: Wann verbringen die Nutzer mehr oder weniger Zeit außerhalb ihres Autos?
- Unter welchen Umständen wird das Auto unbeaufsichtigt gelassen?
- Besuchsgewohnheiten: Wie oft begibt sich der Nutzer an einen bestimmten Ort, z. B. „jedes Wochenende zu einem bestimmten Supermarkt, einer Bar oder Diskothek“?
- Umgebung: Diese Daten sind im Prinzip die gleichen wie in Use-Case 1, variieren jedoch in ihrer Abhängigkeit von der Umgebung. Auf einem gefüllten Parkplatz kann das Auto pro Zeiteinheit mehr Nummernschilder erfassen als auf einer Autobahn, aber vermutlich weniger Gesichter, weil die meisten Autos leer sind. Auf dem Weg zum Parkplatz werden allerdings vermutlich oft mehr Gesichter erfasst werden, weil z. B. Fußgänger die Straßen überqueren, als auf dem Parkplatz selbst, vermutlich sogar mehr als auf der Autobahn.

Da es keine direkte Wechselwirkung zwischen Fahrer und Fahrzeug gibt, werden keine Daten über das Fahrverhalten erfasst.

24.2.2.3 Use-Case 3: Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Use-Case 3 ist Use-Case 1 ähnlich, da in beiden Fällen der Fahrroboter die Aufgabe des Fahrens ausführt und der menschliche „Fahrer“ in dieser Situation als Passagier die Hände vom Lenkrad sowie die Füße von den Pedalen nehmen und andere Dinge tun kann. In Use-Case 3 kann der Fahrer jedoch in mehr Situationen die Kontrolle an den Fahrroboter übergeben und ist nicht wie in Use-Case 1 auf Autobahnen beschränkt. Folglich sind die neuen

und zusätzlichen Daten, die das Auto in diesem Use-Case sammeln und lernen kann, grundsätzlich die gleichen wie in Use-Case 1. Allerdings gibt es mehr Optionen für den Fahrer, die Aufgabe des Fahrens zu delegieren und die Kontrolle zurück zu übernehmen. Dies kann dazu führen, dass mehr Daten über das Verhalten des Fahrers erhoben werden können. Hierzu zählen insbesondere Daten über die Umstände, unter denen der Fahrer die Kontrolle delegiert und/oder wieder übernimmt. Ähnlich wie in Use-Case 2 können die Daten der Umgebung umfangreicher und sensibler sein, als die auf einer Autobahn gesammelten Daten aus Use-Case 1.

24.2.2.4 Use-Case 4: Vehicle-on-Demand

Der Fahrroboter fährt das Fahrzeug in allen Szenarien mit Insassen, mit Fördergut, aber auch komplett ohne Inhalt autonom. Durch den Fahrroboter kann das Fahrzeug überall bereitgestellt werden. Passagiere können die Fahrzeit komplett frei für andere Dinge als für die Bewältigung der Fahraufgabe nutzen. Der Innenraum kann ohne die Einschränkungen eines Fahrersitzes völlig frei gestaltet werden, möglich ist jedoch eine Kamera, die in Richtung des Fahrgastraumes positioniert ist.

Während dieser Use-Case der anspruchsvollste aus der Perspektive des autonomen Fahrens ist, können weniger zusätzliche Daten gesammelt werden als in Use-Case 3. Insbesondere können keine zusätzlichen Daten über das Verhalten eines Fahrers gesammelt werden, da kein Fahrer mehr benötigt wird. Zusätzlich gesammelte Daten sind in diesem Case:

- Reiseverhalten (z. B. wann wollen Passagiere Pausen einlegen?),
- allgemeines Verhalten (oder Fehlverhalten) aller Passagiere im Auto,
- Daten über die Umgebung, beispielsweise, um einen Unfall und dessen Ursache zu dokumentieren (wenn Daten von Passagieren als nützlich für die Unfalldokumentation erachtet werden).

24.2.3 Konsequenzen von Datenspeicherung für die Kontrolle über Daten und Missbrauch

Grundsätzlich eröffnet die Speicherung von Daten die Möglichkeit für jede Art der Verarbeitung dieser Daten. Das mag theoretisch trivial erscheinen; jedoch ergeben sich die praktischen Folgen einer Datenspeicherung daraus, dass die gespeicherten Daten auch später noch gebraucht und missbraucht werden können, möglicherweise auch unter Umständen, die dem Nutzer ursprünglich gar nicht bewusst waren. Dies impliziert eine längerfristige Verantwortung für diese Daten. Diese Verantwortung muss bei der Partei liegen, die die Daten kontrollieren und Entscheidungen über deren Nutzung treffen kann.

Wenn man davon ausgehen kann, dass sich die im Auto gespeicherten Daten unter der alleinigen Kontrolle des Besitzers oder Fahrers des Autos befinden, kann die Frage nach der Verantwortung über die Daten relativ leicht beantwortet werden. Ist dies nicht der Fall,

erweitert sich die Verantwortung für die Speicherung und jede Art von Missbrauch der Daten auf die Parteien, die Speicherung und/oder Transfer der Daten kontrollieren.

Es gibt mindestens zwei Anzeichen dafür, dass einflussreiche Institutionen verlangen werden, die Daten aus dem Auto auch nach außerhalb zu transferieren:

1. Strafverfolgungsbehörden fordern häufig, dass Daten, die für technische oder kommerzielle Zwecke gespeichert werden, auch für Zwecke der Strafverfolgung zur Verfügung gestellt werden sollen. Gesetzgeber folgen dieser Forderung häufig. Das Autos und Ortsdaten ähnlichste Beispiel ist das der Mobilkommunikation. Seit dem Beginn der 1990er-Jahre war der GSM-Standard für zellbasierte Mobilkommunikation implementiert, und Ortsinformationen der Teilnehmer wurden in den Netzen verarbeitet. Schon bald darauf wurden einschlägige Regulierungen eingeführt, um es den „Bedarfsträgern“, etwa Strafverfolgungsbehörden, zu ermöglichen, auf alle Arten von Daten (inklusive Ortsdaten) in den GSM-Netzen zuzugreifen: Ein Beispiel hierfür ist die deutsche Fernmeldeüberwachungsverordnung [6], die bereits 1995 eingeführt wurde.
2. Internet-Unternehmen wie Google sind inspiriert und angetrieben durch die Konnektivität beliebiger Systeme und die Übermittlung von Daten. Ein Beispiel ist ein Statement von Jared Cohen, Direktor von Google Ideas, und Eric Schmidt, Executive Chairman von Google, in den Schlussfolgerungen ihres gemeinsamen Buches *The New Digital Age*: „Attempts to contain the spread of connectivity or curtail people’s access will always fail over a long enough period of time – information, like water, will always find its way through.” ([7], S. 254)

Nicht alles, was einflussreiche Institutionen gefordert haben, ist letztendlich auch so eingetreten, aber die Beispiele geben einen Eindruck von den Herausforderungen, die die Speicherung von Daten mit sich bringt, auch wenn die Daten eigentlich wohlbehalten in abgeschlossener und isolierter Weise gespeichert werden sollten.

24.2.4 Konsequenzen der Weitergabe von Daten an Dritte

Daten, die an Dritte jenseits der Domänen von Autoeignern oder -fahrern transferiert werden, ermöglichen es diesen Dritten, ihre Interessen zu verfolgen. Diese Interessen können mit den Interessen der sogenannten Datensubjekte, die durch die Daten identifiziert werden (in diesem Fall sind das typischerweise Autofahrer oder -eigner) im Konflikt stehen.

In diesem Abschnitt werden Beispiele für die folgenden Drittparteien diskutiert: Fahrzeughersteller, Versicherungsdienstleister, Flottenbetreiber, staatlich autorisierte Parteien, Peer-ad-hoc-Netzwerke, z. B. andere Verkehrsteilnehmer oder andere autonome Fahrzeuge, und Verkehrszentralen. Die Reihenfolge der Unterabschnitte folgt der ansteigenden Komplexität im Setting der Drittparteien.

24.2.4.1 Fahrzeughersteller

Fahrzeughersteller können daran interessiert sein, das Verhalten des Fahrzeugs zu dokumentieren, um Erkenntnisse über das Fahrzeug in Extremsituationen zu sammeln oder die Qualität der (oft sehr komplexen) Software zu testen. Dies ermöglicht ihnen, ihre Systeme zu verbessern und weiterzuentwickeln. Diese Art von Daten ähnelt denen, die Hersteller und Betreiber von Telekommunikationssystemen zum Zwecke der Qualitätssicherung und Wartung sammeln. Gleichzeitig beinhalten diese Daten jedoch sensitive Informationen über die Fahrer, z. B. die typische Fahrgeschwindigkeit, die Anzahl der Notbremsungen oder verpasste Übergaben vom Fahrroboter in den Use-Cases 1 und 3.

24.2.4.2 Versicherungsdienstleister

Versicherungsdienstleister sind häufig an ausführlicheren Informationen über ihre Kunden interessiert, um das Risiko, auf das sie sich einlassen, zu bewerten. Abhängig von der Art der Versicherung können unterschiedliche Informationen von Interesse sein. Für eine Unfallversicherung kann das Risiko beispielsweise vom Fahrverhalten (vorsichtiger oder risikofreudiger Fahrstil) abgeleitet werden, während für eine Diebstahlversicherung insbesondere ortsbezogene Daten (Regionen mit höherem oder niedrigerem Diebstahlrisiko für das jeweilige Fahrzeug) von Bedeutung sind. Alle Use-Cases liefern hier umfängliche Daten. Use-Case 1 und 3 bieten vor allem Daten über das Fahrverhalten, Use-Case 4 ermöglicht das Erheben von Daten über das Verhalten der Insassen und deren Notrufe. Ortsbezogene Daten werden in allen Use-Cases erhoben. Diese Bewertungen ermöglichen vielleicht fairere Beurteilungen der Versicherungskunden, da sie ein kostenreduzierendes Verhalten belohnen. Die Nutzer werden dadurch aber auch einer erhöhten Überwachung ausgesetzt, ohne genaue Erläuterungen der damit verbundenen Risiken und Chancen zu erhalten. Versicherungsdienstleister treffen Entscheidungen oft auf Grundlage von Scoring-Systemen. Von diesen Systemen oder den von ihnen verwendeten Daten und Kriterien wissen Kunden oft nichts, da Versicherungsunternehmen diese Informationen als Geschäftsgeheimnisse betrachten und vor der Konkurrenz geheim halten wollen. Das führt dazu, dass Kunden von den Reaktionen einer Versicherung – wie der Verweigerung einer Vertragsverlängerung oder der Erhöhung einer Prämie – leicht überrascht werden können.

24.2.4.3 Flottenbetreiber

Flottenbetreiber, etwa Autovermietungen, sind in einer ähnlichen Situation wie Versicherungsunternehmen. Um ihren geschäftlichen Erfolg zu steigern, versuchen sie, das Risiko der Autovermietung an die jeweiligen Kunden zu bewerten und das Ergebnis in ihre Preisgestaltung einfließen zu lassen. Daher kann es zu ähnlichen Konsequenzen für die Kunden kommen wie bei Versicherungen (z. B. in Bezug auf (k)eine Verlängerung des Vertrages oder eine Erhöhung der Gebühren). Auch in diesem Szenario könnten in allen Use-Cases Daten erhoben werden. Der wesentliche Unterschied zum Versicherungsszenario ergibt sich aus der Tatsache, dass Flottenbetreiber in der Regel die Besitzer der Autos sind und somit mehr Kontrolle über ihre Autos haben als eine Versicherung über versicherte Autos ihrer Kunden. Dieser Unterschied ist wichtig für jegliches Konzept eines „Private Data

Vault“ zur Speicherung sensibler Daten von Mietern oder Fahrern (s. Abschnitt 24.5). Ein solches „Private Data Vault“ müsste in diesem Szenario entweder speziell im Auto installiert werden, um es vor dem Zugriff des Flottenbetreibers zu schützen, oder vom Mieter oder Fahrer mitgebracht werden.

24.2.4.4 Kommerzielle standortbezogene Dienste

Werbetreibende Unternehmen sind daran interessiert, jeweils passende Werbenachrichten an die jeweilige Zielgruppe zu adressieren. Dies beinhaltet auch die Wahl der richtigen Orte für entsprechende Werbebotschaften. So könnten beispielsweise Pendler, die aktuell im Stau stehen, mit einem Sonderangebot von Geschäften in der Nähe der nächsten Ausfahrt adressiert werden, damit sie aus dem Stau heraus zum Einkaufen fahren. Ebenso können Reisende, die auf dem Weg zu einem großen Flughafen im Stau stehen, von einem besser zu erreichenden Regionalflughafen umworben werden, damit sie ihren nächsten Flug von dort aus buchen: So werden auf der Autobahn von Norden in Richtung Flughafen San Francisco Flüge ab San José beworben. Deshalb interessieren sich werbetreibende Unternehmen für Verkehrsströme (und Staus). Darüber hinaus sind sie immer an weiteren Details über ihre Zielgruppe interessiert, die es ihnen erlauben, Rückschlüsse auf deren Verhalten wie z. B. die Art der Reise (Geschäftsreise, Pendeln, Freizeitausflug) zu ziehen.

24.2.4.5 Staatlich autorisierte Stellen

Staatlich autorisierte Stellen wie Polizeien oder Geheimdienste können die Daten zum Zwecke der Überwachung verwenden, um Verhalten zu erkennen, das sie sanktionieren oder vermeiden wollen. Im Falle der Verkehrspolizei könnte dies jede Art von Verhalten sein, das als unsicher angesehen wird oder gegen Verkehrsregeln verstößt wie z. B. Schwierigkeiten oder auffälliges Verhalten in der Interaktion mit dem Fahrröbter. Polizeikräfte, die Verbrechen untersuchen oder verhindern wollen, sowie Geheimdienste können an Navigations- oder Bewegungsdaten interessiert sein, um Informationen über das soziale Umfeld von Reisenden zu erlangen, etwa, wer wen wo trifft. Mit großer Wahrscheinlichkeit werden interessierte Geheimdienste und Bedarfsträger zudem eine ganz eigene Interpretation davon haben, wozu sie jenseits der Garantien und Zusicherungen von Datenschutzgesetzen autorisiert sind. Dies gilt vor allem für Daten, die Autos von ihrer Umgebung sammeln würden. Mit dem Ansatz, dass Daten von vielen oder sogar allen Autos kombiniert werden, ist eine spezifische Form des *crowd-sourcing* vorstellbar. Einige Gemeinden nutzen bereits heute *crowd-sourcing*, um Daten zur Umweltbelastung zu sammeln. Auch wenn in diesem Fall keine oder nur wenige personenbezogenen Daten gesammelt werden, ist das Beispiel dem Szenario, in dem ein Auto seine Umgebung ausspioniert, konzeptionell nahe.

24.2.4.6 Peer-ad-hoc-Netzwerke

Peer-ad-hoc-Netzwerke (z. B. andere Verkehrseinheiten oder autonome Fahrzeuge) können an jeglichen Daten zur Optimierung der Wegführung und Stabilisierung interessiert sein, die ihnen dabei helfen, die Straßenverhältnisse besser zu bewerten. Dabei können die In-

formationen anderer (etwa entgegenkommender) Fahrzeuge helfen, da diese ja bevorstehende Straßenabschnitte der eigenen Route schon passiert haben. Sofern es sich dabei um anonymisierte Daten handelt, die lediglich unter den beteiligten Peers ausgetauscht werden, sind die Folgen weniger schwerwiegend als bei Datenübertragungen zu einer (zentralen) Einrichtung, die Daten aggregiert (wie andere in diesem Kapitel beschriebene Einrichtungen).

24.2.4.7 Verkehrszentralen

Die Interessen von Verkehrszentralen hängen stark von den Interessen ihrer Betreiber und Eigentümer ab. Verkehrszentralen, die Verkehrsströme effizienter gestalten und die Auswirkungen von Verkehrsunfällen auf den Verkehrsfluss verringern wollen, sind an allen Daten interessiert, die ihnen helfen, die aktuelle und zukünftige Verkehrssituationen besser zu beurteilen: Fahrbedingungen können von Umgebungsdaten oder von Bewertungen des Fahrverhaltens abgeleitet werden, wie sie in allen Use-Cases anfallen; mögliche Staus können aus Reiseplänen und Navigationsdaten abgeleitet werden. Verkehrszentralen können auch an Kooperationen mit anderen Einrichtungen interessiert sein, um ihre Kosten zu refinanzieren oder sogar Gewinne zu erwirtschaften: Dies wird durch die Tatsache gestützt, dass andere Unternehmen, wie in den vorangegangenen Beispielen beschrieben, Nutzen aus den von Verkehrszentralen gesammelten Daten ziehen können.

Das Ausmaß, in dem Verkehrszentralen mit anderen Unternehmen, die an ihren Daten interessiert sind und Geld dafür bieten, kooperieren wollen, hängt von ihrem Status und ihrer finanziellen Ausstattung ab. Eine private gewinnorientierte Verkehrszentrale benötigt eine Finanzierung; eine öffentliche Verkehrszentrale steht eventuell unter geringerem finanziellem Druck. Allerdings gab und gibt es für viele der gegenwärtigen Investitionen in öffentliche Infrastrukturen Überlegungen, sie in öffentlich-privaten Partnerschaften durchzuführen, um sie trotz Geldmangel in den öffentlichen Haushalten durchzuführen. Dies gilt z. B. für die Mauterhebung und war ebenso für das Galileo-Satellitennetz geplant – auch wenn der Plan in diesem Fall mangels privater Interessenten nicht umgesetzt wurde. Auch Rundfunkanstalten werden immer abhängiger von einer privaten Mitfinanzierung, z. B. durch Werbung.

24.3 Gibt es bestimmte Arten von Daten, die spezielle Hindernisse hervorrufen?

Es ist prinzipiell unmöglich, die potenziellen Verwendungen von Daten für legitime oder illegitime Zwecke vorherzusagen. Darüber hinaus hat es sich als unmöglich herausgestellt zu garantieren, dass es auch auf lange Sicht zu keiner Verwendung oder keinem Missbrauch für eine spezielle Art von Daten kommt. Ein Grund hierfür ist, dass die heutige Konnektivität Verknüpfungen von Daten erheblich vereinfacht. Daten über die Fähigkeiten eines Fahrers bei der Übernahme der Kontrolle vom Fahrroboter mögen auf den ersten Blick harmlos erscheinen, setzt man diese jedoch in Bezug zu historischen Daten (Fähigkeiten

vor zehn Jahren) oder zukünftigen Daten (Fähigkeiten in zehn Jahren), kann dies einen Eindruck von steigender oder sinkender Fahrtüchtigkeit verursachen. Dies kann zu ungeRechtfertigten Nachteilen für Fahrer führen, etwa bei der Berechnung von Versicherungsprämien. Ähnliche Bewertungsmethoden bei der Beurteilung der Kreditfähigkeit haben sich in der Vergangenheit häufig als falsch erwiesen, wenn es um individuelle Bewertungen ging, auch wenn sie eine statistische Wertigkeit besaßen. Daher gibt es keine expliziten Regeln, bestimmte Arten von Daten als speziell einzuordnen und spezielle Hindernisse für deren Nutzung vorzusehen. Man mag den Eindruck haben, dass Daten, die Rückschlüsse auf die Gesundheit und medizinische Details erlauben, oder Daten zur politischen Meinung von Personen besonders sensibel sind. Es gibt jedoch keinen eindeutigen Beleg dafür, dass diese Daten immer sensibler sind als z. B. Daten über die finanzielle Situation einer Person.

Die rechtliche Konsequenz der beschriebenen Schwierigkeiten ist das Prinzip, für jedes einzelne Datum die Legitimität der Datenverarbeitung zu prüfen, statt eine allgemeine Freigabe vorzusehen (s. auch die Beschreibungen von „Rechtmäßigkeit und genaue Bestimmung des Zwecks der Datenverarbeitung“ und „Beschränkung der Erfassung“ in Abschn. 24.4.1). Somit muss für jede Art von Daten überprüft werden, ob ihre Erfassung notwendig ist, um den Dienst bereitzustellen, dessentwegen sie erhoben wurden. Zusätzlich ist zu überprüfen, ob die Art der Verarbeitung angemessen ist.

24.4 Anforderungen aus der Perspektive des Datenschutzes

Dieser Abschnitt diskutiert die Anforderungen aus der Perspektive des Datenschutzes. Einführend werden international etablierte Grundsätze und ihr Bezug zu den Use-Cases erläutert (s. Abschn. 24.4.1). Anschließend werden in Abschn. 24.4.2 zusätzliche Überwachungsmaßnahmen mit dem Ziel einer „datenschutzverträglichen“ Verwendung der Daten diskutiert, bevor in Abschn. 24.4.3 das Augenmerk auf die Beschränkung von Zugriffsrechten und auf den Einsatz von Datenverschlüsselung gelegt wird.

24.4.1 Grundsätze

Für jegliche Art persönlicher Daten, die erhoben oder erfasst und aus dem Einflussbereich der betroffenen Person heraus übermittelt werden, muss es eine klare Begründung geben, die die einschlägigen Datenschutzgrundsätze und -anforderungen berücksichtigt. Die Datenschutzgrundsätze und -anforderungen hängen von der jeweiligen nationalen, regionalen und gelegentlich auch branchenspezifischen Gesetzgebung ab, sodass eine vollständige Analyse hier unmöglich wäre. Erfreulicherweise existiert seit 2011 die internationale Norm ISO/IEC 29100 „Privacy Framework“ [8], die elf Datenschutzgrundsätze enthält. Diese Grundsätze wurden aus Datenschutzgrundsätzen abgeleitet, die in den Jahren und Jahrzehnten zuvor von Staaten, Ländern und internationalen Organisationen (z. B. der OECD und der EU) in ihren jeweiligen Regulierungen entwickelt worden waren. Die Editoren der

Norm kamen aus Deutschland und den USA, und Experten aus vielen weiteren Ländern beteiligten sich an dem Normprojekt. Ein Schwerpunkt der ISO/IEC 29100 „Privacy Framework“ ist die Implementierung der Datenschutzgrundsätze in IKT (Informations- und Kommunikationstechnologie)-Systemen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung von Datenschutzmanagement-Systemen, die in die IKT-Systeme von Organisationen integriert sind. Die Datenschutzgrundsätze zielen darauf, die Gestaltung, Entwicklung und Implementierung von Datenschutzrichtlinien und -kontrollen anzuleiten. Ein Entwurf verwandter Anforderungen findet sich auch in den jüngsten Empfehlungen des Deutschen Verkehrsgerichtstages [9]. Die elf Grundsätze lauten:

1. Einwilligung und Wahlfreiheit,
2. Rechtmäßigkeit und genaue Bestimmung des Zwecks der Datenverarbeitung,
3. Beschränkung der Erfassung,
4. Datenminimierung,
5. Beschränkung der Verwendung, Speicherung und Weitergabe,
6. Richtigkeit und Qualität,
7. Offenheit, Transparenz und Auskunft,
8. Individuelle Beteiligung und Zugriff,
9. Rechenschaftspflicht,
10. Informationssicherheit,
11. Erfüllung der Datenschutzerfordernisse.

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Erläuterung der wichtigsten Grundsätze und gibt Beispiele basierend auf den Use-Cases.²

1. Einwilligung und Wahlfreiheit

Das Prinzip der Einwilligung wurde im Laufe der Zeit eingeführt, um sicherzustellen, dass eine von der Verarbeitung ihrer PII betroffene Person kontrollieren kann, ob ihre PII verarbeitet wird oder nicht. Eine Ausnahme von diesem Prinzip bilden Gesetze, die explizit eine Verarbeitung von PII ohne Einwilligung erlauben. Es wird aufgrund einschlägiger Erfahrungen ausdrücklich erwähnt, dass die Einwilligung eine informierte Einwilligung sein muss, damit Betroffene erklärt bekommen, wozu sie einwilligen und nicht „über den Tisch gezogen“ werden. Die Einwilligung muss außerdem in Form einer expliziten Einwilligungserklärung (*opt-in*) erfolgen. Es hat sich herausgestellt, dass die Forderung nach Wahlfreiheit wichtig ist, um zu vermeiden, dass Benutzer faktisch gezwungen werden einzuwilligen, weil sie keine Alternative zu dem jeweiligen Dienst haben. In den Use-Cases 1, 2 und 3 wird die Einwilligung des Besitzers, des Fahrers und jedes identifizierten Mitfahrers benötigt. Im vierten Use-Case wird die Einwilligung der Mitfahrer und gegebenenfalls des Fahrers benötigt. Die kritischste Frage entsteht jedoch bei der Einwilligung zur Verarbeitung der Daten

² ISO/IEC 29100 erläutert die Grundsätze ausführlicher.

der untersuchten Umgebung. Zum Beispiel sind private Überwachungskameras üblicherweise nicht rechters, wenn sie öffentliche Flächen mit einbeziehen und dort Daten von Personen erfassen können. Für Daten von öffentlichen Überwachungskameras gibt es strikte Regeln entlang der folgenden Grundsätze.

2. **Rechtmäßigkeit und genaue Bestimmung des Zwecks der Datenverarbeitung**
Sich an diesen Grundsatz zu halten bedeutet: Sicherstellung, dass der Zweck der Datenverarbeitung vollständig geltendem Recht entspricht und sich auf eine zulässige Grundlage stützt; Kommunikation des Zwecks an den Betroffenen, bevor die Information erfasst oder für einen neuen Zweck benutzt wird; Verwendung einer Sprache für die Spezifikation, die klar und den jeweiligen Umständen angemessen ist; und, wenn zutreffend, die Bereitstellung von hinreichenden Erläuterungen für die Notwendigkeit der Verarbeitung sensibler PII. Ein Zweck kann eine gesetzliche Grundlage oder eine spezifische Autorisierung seitens einer autorisierten Datenschutz- oder Regierungsbehörde erfordern. Wenn der Zweck der Verarbeitung der PII nicht den einschlägigen Gesetzen entspricht, darf keine Verarbeitung stattfinden. Für die Use-Cases bedeutet dies, dass die Zwecke der Datenverarbeitung auf eine klare Art und Weise spezifiziert werden müssen. Dies wird eine besondere Herausforderung im Fall des Erfassens von Umgebungsdaten darstellen.
3. **Beschränkung der Erfassung**
Die Erfassung von PII muss im Rahmen der jeweiligen gesetzlichen Vorschriften bleiben und ist auf solche Daten zu begrenzen, die für den beschriebenen Zweck notwendig sind: In unserem Fall trifft dies auf alle Daten über das Verhalten des Fahrers und der identifizierten Mitfahrer zu. Wenn der Zweck das autonome Fahren ist, werden jegliche gesammelten Daten mit dem Zweck des autonomen Fahrens gerechtfertigt werden müssen (und nicht mit einer anderen Verwendung, auch wenn diese beispielsweise kommerziell attraktiv erscheint).
4. **Datenminimierung**
Das Prinzip der Datenminimierung ist eng mit dem Prinzip der Beschränkung der Erfassung verknüpft, bezieht sich aber auf eine strikte Minimierung der *Verarbeitung* von PII. Datenverarbeitungsprozeduren und IKT-Systeme sollen die PII minimieren, die verarbeitet wird, und den Zugriff darauf begrenzen; Default-Optionen sollen, wenn immer möglich, betroffene Personen nicht identifizieren, die Möglichkeit ihrer Überwachung reduzieren und die Verknüpfbarkeit der erfassten PII mit anderer PII begrenzen (und so auch die Verfolgbarkeit der betroffenen Personen); außerdem ist PII zu löschen und zu beseitigen, sobald der Zweck der PII-Verarbeitung entfallen ist, oder, falls es keine rechtliche Anforderung gibt, die PII aufzubewahren oder wann immer Löschen und Beseitigen zweckmäßig sind. Bei allen vier Use-Cases beschränkt dieser Grundsatz die Übertragung jeglicher Daten an zentrale Einheiten wie etwa Verkehrszentralen; PII, die nur benötigt wird, um die Situation im und um das Auto zu bewältigen, darf ohne Erlaubnis der betroffenen Personen nicht das Auto verlassen. Datenminimierung erfordert auch die Begrenzung der Speicherung erfasster Daten, insbesondere, wenn diese Daten einfach erneut erfasst werden können, sobald sie

wieder benötigt werden. Um die Verknüpfbarkeit gesammelter PII zu beschränken, wird zudem die Anonymisierung und Aggregation jeglicher Daten verlangt, die nicht individuell benötigt werden.

5. Informationssicherheit

Informationssicherheit bezieht sich auf den Schutz von PII mit entsprechenden Maßnahmen auf der operationellen, funktionalen und strategischen Ebene, um die Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit der PII zu gewährleisten und sie über den gesamten Lebenszyklus hinweg gegen Risiken wie nicht autorisierten Zugriff, nicht autorisierte Vernichtung, nicht autorisierte Modifizierung, nicht autorisierte Veröffentlichung oder Verlust zu schützen. Informationssicherheit umfasst gegebenenfalls die Auswahl eines geeigneten Auftragsverarbeiters, um den Zugriff auf die PII auf diejenigen zu beschränken, die zur Ausübung ihrer Pflichten zugreifen müssen. Abschnitte 24.4.2 und 24.4.3 beschreiben entsprechende Maßnahmen.

Die Verwendung von Daten jenseits dessen, was für die Zurverfügungstellung eines Dienstes (für die die Daten erfasst wurden) nötig ist, erfordert eine explizite Einwilligung. Daher bedarf es für jegliche PII, die den Einflussbereich des PII-Prinzips verlässt, einer klaren und aussagekräftigen Begründung unter Berücksichtigung der einschlägigen Datenschutzgrundsätze. Die Begründung muss den PII-Prinzipal darüber informieren, was er gewinnt und was er dafür aufgibt. Praktisch muss die Begründung also überzeugend, aber nicht tendenziös sein. Davon muss auch die Aufsichtsbehörde überzeugt sein, wenn sie prüft, ob der PII-Prinzipal getäuscht wurde, z. B. durch die Behauptung der Notwendigkeit einer Datenverarbeitung, die nicht notwendig war, wenn nach dem Prinzip der Datenminimierung eine alternative Methode oder Technologie hätte gewählt werden können. Die Aufsichtsbehörde wird auch überprüfen, ob Grundrechte durch die Verarbeitung der Daten gefährdet würden. Grundrechte können nicht einfach durch die Einwilligung der Benutzer aufgegeben werden, da die Benutzer möglicherweise nicht die damit verbundenen Konsequenzen erkennen. Ein verwandtes Beispiel wäre, Benutzer einer Wahlmaschine zu bitten, ihr Wahlverhalten speichern und verarbeiten zu dürfen.

Jede PII, die eine Diskriminierung von Personen aufgrund ihrer Gesinnung ermöglicht, ist in vielen praktischen Fällen besonders kritisch zu betrachten. Einschlägige Beispiele sind die Interessengebiete und entsprechenden Orte und Fahrtrichtungen, etwa zu einer politischen Demonstration und auch in Verbindung zu Aufenthaltsorten und Fahrtrichtungen anderer Personen, etwa in Bürgerinitiativen. Ein Beispiel für eine Begründung steht in der Grundsatzentscheidung des Deutschen Bundesverfassungsgerichtes von 1983 [10], die für Deutschland das Grundrecht auf „informationelle Selbstbestimmung“ etabliert hat und fordert, einen *Chilling Effect* bei der Bürgerbeteiligung in demokratischen Prozessen zu vermeiden:

Wer nicht mit hinreichender Sicherheit überschauen kann, welche ihn betreffenden Informationen in bestimmten Bereichen seiner sozialen Umwelt bekannt sind, und wer das Wissen möglicher Kommunikationspartner nicht einigermaßen abzuschätzen vermag, kann

in seiner Freiheit wesentlich gehemmt werden, aus eigener Selbstbestimmung zu planen und zu entscheiden. Mit dem Recht auf informationelle Selbstbestimmung wären eine Gesellschaftsordnung und eine diese ermöglichende Rechtsordnung nicht vereinbar, in der Bürger nicht mehr wissen können, wer was wann und bei welcher Gelegenheit über sie weiß. Wer unsicher ist, ob abweichende Verhaltensweisen jederzeit notiert und als Information dauerhaft gespeichert, verwendet oder weitergegeben werden, wird versuchen, nicht durch solche Verhaltensweisen aufzufallen. Wer damit rechnet, daß etwa die Teilnahme an einer Versammlung oder einer Bürgerinitiative behördlich registriert wird und daß ihm dadurch Risiken entstehen können, wird möglicherweise auf eine Ausübung seiner entsprechenden Grundrechte (Art. 8, 9 GG) verzichten. Dies würde nicht nur die individuellen Entfaltungschancen des Einzelnen beeinträchtigen, sondern auch das Gemeinwohl, weil Selbstbestimmung eine elementare Funktionsbedingung eines auf Handlungs- und Mitwirkungsfähigkeit seiner Bürger begründeten freiheitlichen demokratischen Gemeinwesens ist.

Hieraus folgt: Freie Entfaltung der Persönlichkeit setzt unter den modernen Bedingungen der Datenverarbeitung den Schutz des Einzelnen gegen die unbegrenzte Erhebung, Speicherung, Verwendung und Weitergabe seiner persönlichen Daten voraus. Dieser Schutz ist daher von dem Grundrecht des Art. 2 Abs. 1 in Verbindung mit Art. 1 Abs. 1 GG umfaßt. Das Grundrecht gewährleistet insofern die Befugnis des Einzelnen, grundsätzlich selbst über die Verwendung seiner persönlichen Daten zu bestimmen.

Ähnliche Überlegungen sind besonders in Ländern mit instabilen politischen Verhältnissen relevant, wo Bürger befürchten müssen, dass zukünftige Machthaber ihr Verhalten, das gegenwärtig völlig legal ist, im Rückblick nicht tolerieren. Dies kann auch die Reise zu politischen Treffen einschließen.

Hinzu kommt, dass die Veröffentlichungen von Edward Snowden [11] ernstzunehmende Schwächen im Datensicherheitsregime vieler PII-Verarbeiter aufgezeigt haben. Dies gilt insbesondere für Daten und PII, die für Geheimdienste interessant sind. Man kann erwarten, dass diese Entwicklung in zukünftige Risikoanalysen und Überlegungen mit einbezogen wird.

24.4.2 Weitere Überwachungsmaßnahmen für eine datenschutzverträgliche Verwendung der zusätzlichen Daten

Weitere Überwachungsmaßnahmen für eine datenschutzverträgliche Verwendung der zusätzlichen Daten sind zu erwarten. Sie sind z. B. durch den Grundsatz der Rechenschaftspflicht in der Norm ISO/IEC 29100 [8] motiviert.

Der Grundsatz der Rechenschaftspflicht beabsichtigt, dass die Verarbeitung von PII die Pflicht zur Sorgfalt und zur Aneignung konkreter und praktischer Maßnahmen zum Schutz der PII mit sich bringt. Dies gilt für alle, die PII verarbeiten. Diese Maßnahmen sind nicht nur dazu vorgesehen, die Verarbeitung abzusichern, sondern auch die Aufsicht durch die zuständigen Behörden (z. B. Datenschutzbeauftragte) zu ermöglichen und zu vereinfachen.

Der Grundsatz der Informationssicherheit (s. auch Abschn. 24.4.1) erfordert z. B. Kontrollen auf der operationalen, funktionalen und strategischen Ebene, um die Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit der PII sicherzustellen und sie über den gesamten Lebenszyklus hinweg gegen Risiken wie nicht autorisierten Zugriff, nicht autorisierte Vernichtung, nicht autorisierte Modifizierung, nicht autorisierte Veröffentlichung oder Verlust zu schützen.

Typischerweise ist es wichtig zu überprüfen, wer Zugriff auf die PII hatte oder hat und wer mit ihr auf welche Art und Weise arbeitete oder arbeitet. Daher werden für jede zusätzliche Entität, die möglicherweise einen Zugriff auf die PII hat, zusätzliche Überwachungsmaßnahmen anfallen. Erfahrungen mit Audit-Maßnahmen zeigten, dass diese zu zusätzlichen Datenschutzproblemen führen können, da Audit-Aufzeichnungen noch kritischer und diskriminierender als die PII selbst sein können. Ein Beispiel hierfür wäre ein Eintrag in der Audit-Aufzeichnung einer Verkehrszentrale, dass die PII zu den Reaktionszeiten eines bestimmten Fahrers in der Interaktion mit dem Fahrroboter durch eine Arbeitsgruppe eingesehen wurde, die gefährliches Fahrverhalten analysieren soll.

Darüber hinaus sollten zusätzliche Überwachungsmaßnahmen nicht zu übermäßiger Überwachung der Individuen führen, die mit dem System arbeiten, zumindest in den Rechtssystemen, die Arbeitnehmerdatenschutz vorsehen. Hier ist der Grat zwischen Kundendatenschutz und Arbeitnehmerdatenschutz besonders schmal und komplex.

24.4.3 Beschränkung von Zugriffsrechten und Einsatz von Verschlüsselung

Beschränkung von Zugriffsrechten und Einsatz von Verschlüsselung sind typische Instrumente der Informationssicherheit. Die Beschränkung von Zugriffsrechten folgt dem Grundsatz „Informationssicherheit“ in ISO/IEC 29100: Der Zugriff auf PII ist auf diejenigen zu begrenzen, die den Zugriff benötigen, um ihre Aufgaben zu erfüllen, und auf genau die PII, die sie für diese Aufgaben benötigen. Zugriffskontrollen können genau festlegen, wer auf welche PII zugreifen darf. Dies setzt eine detaillierte Spezifikation des Systems voraus und kann am besten erreicht werden, wenn Datenschutz schon in der Entwurfsphase berücksichtigt wurde, beispielsweise, wenn festgelegt wird, welche Daten durch das Fahrzeug gesammelt werden und für welche Anwendung sie benötigt werden.

Ein anderer Weg, Zugriffsrechte zu beschränken, ist festzulegen, dass Gruppen von Entitäten nur gemeinsam Zugriff auf bestimmte Daten erhalten (z. B. auf jegliche Art von Audit-Aufzeichnungen). Dieses Vier-Augen-Prinzip (oder n-Augen-Prinzip) schützt zu einem gewissen Grad vor unerlaubter Nutzung von Daten und kann insbesondere bei Audit-Aufzeichnungen zur Kontrolle des Systemverhaltens angewendet werden, wenn diese Aufzeichnungen auch PII beinhalten. Es kann beispielsweise festgelegt werden, dass diese Arten von Daten nur verfügbar gemacht werden, um einen genau beschriebenen Systemfehler zu adressieren, und dass PII-Prinzipal und die interessierte Partei (beispielsweise eine autorisierte Werkstatt) sich über den Zugriff einigen müssen. Das n-Augen-Prinzip

kann auch durch Verschlüsselung realisiert werden, indem Teile des Schlüssels unter den jeweiligen Stakeholdern verteilt werden.

Verschlüsselung wird in der ISO/IEC 29100 nicht direkt erwähnt, und ihr Nutzen wird in einigen ISO/IEC-Mitgliedsstaaten manchmal kontrovers diskutiert. Wohl aber wird Verschlüsselung als Beispiel für eine Anforderung an die Übermittlung medizinischer PII über öffentliche Netzwerke erwähnt ([8], Clause 4.4.7). Verschlüsselung wird auch mehr und mehr von Datenschutzbeauftragten gefordert, die ihren Mehrwert verstanden haben, insbesondere wenn es darum geht, die Speicherung und Übertragung von PII zu schützen, auch ohne sich auf diejenigen, die die PII physikalisch speichern oder transportieren, verlassen zu müssen. Wenn Verschlüsselung verwendet wird, ist es wichtig, klar festzulegen, wer die Schlüssel für die Ver- und Entschlüsselung besitzt. Es kann sich anbieten, PII, die Rückschlüsse auf das Verhalten und die Fähigkeiten eines PII-Prinzipals erlaubt, durch die Verwendung eines asymmetrischen Verschlüsselungssystems zu schützen. Die PII wird dann mittels des öffentlichen Schlüssels des jeweiligen PII-Prinzipals verschlüsselt. Dies stellt dann sicher, dass die PII nur durch den dazugehörigen privaten Schlüssel des PII-Prinzipals entschlüsselt werden kann.

24.5 Architekturüberlegungen

Architekturen zur Datenverarbeitung müssen Interessen der Stakeholder des Systems berücksichtigen. Die in diesem Beitrag bisher erwähnten PII-Stakeholder sind Fahrer, Mitfahrer und Besitzer der Autos. Weitere Stakeholder sind möglicherweise Individuen, die mit den PII arbeiten müssen, eventuell auch eigentlich Unbeteiligte oder andere Verkehrsteilnehmer, wenn sie vom System identifiziert werden können.³ Es ist sinnvoll, insbesondere nicht professionelle Benutzer des Systems zu betrachten, da diese normalerweise weniger Möglichkeiten besitzen, sich selbst zu schützen [12]. Sie sind üblicherweise auch diejenigen, um die sich Datenschutzbeauftragte kümmern.

Im Allgemeinen können Architektureigenschaften von den in Abschn. 24.4.1 diskutierten Grundsätzen abgeleitet werden. Insbesondere die Grundsätze der Beschränkung der Erfassung, der Datenminimierung und der Informationssicherheit sind für Architekturen relevant. Eine Architektur, die die jeweiligen Dienste unter weniger Erfassung, Verwendung und Verbreitung von PII bereitstellt, mindert nicht nur die schädlichen Folgen eines Missbrauchs, sondern erleichtert auch die Sicherung der Informationen.

Drei Eigenschaften und Elemente von Architekturen sind besonders zu empfehlen:

1. Dezentrale Ansätze

Wenn PII nicht zu zentralen Entitäten, wie Verkehrszentralen, transferiert wird, ist das Risiko des Missbrauchs reduziert. Beispiele hierfür sind:

³ Dies mag eine Motivation sein, das System so zu gestalten, dass Unbeteiligte und andere Verkehrsteilnehmer nicht identifiziert werden können.

- Wenn in einem der Use-Cases eine Situation direkt zwischen zwei Fahrzeugen geklärt werden kann, ist dies besser, als die Verkehrszentrale oder andere externe Entitäten einzubeziehen. Manchmal wird das Thema der Vertrauenswürdigkeit der durch andere Fahrzeuge bereitgestellten Informationen zur Sprache gebracht. Eine einfache Lösung hierfür scheint die individuelle Identifikation von Fahrzeugen und der Abgleich mit einer zentralen Registrierungsdatenbank zu sein, ähnlich wie ein Polizeiauto Kennzeichen von Autos überprüft. Dieses Szenario mag ein schönes Vermarktungsszenario für den Vertrieb von Verzeichnisdiensten sein, es aber als Gewinn für Datenschutz oder Sicherheit zu betrachten, wäre zu kurzfristig. Das Szenario würde eine im Ausnahmefall stattfindende Polizeiaktivität zu einer regelmäßigen Aktivität machen, die möglicherweise von jedem Fahrzeug ausgeführt werden kann und so eine umfangreiche Massenüberwachungsinfrastruktur etablieren würde. Zudem gibt die Möglichkeit, Autos präzise zu identifizieren, keinerlei Garantie für die Informationen, die von diesem Fahrzeug bereitgestellt werden. Diese Informationen können auch dann manipuliert oder irreführend sein, wenn das Fahrzeug, das die Informationen bereitstellt, einen gültigen Identifikator vorweist.
- Das Konzept eines benutzereigenen „Private Data Vault“ (PDV) zur Speicherung von PII sollte näher untersucht werden, um die Speicherung sensibler Daten unter Kontrolle der Nutzer zu ermöglichen. Ein PDV könnte die PII des jeweiligen Nutzers speichern und gegen ungewollten Zugriff schützen, sodass kein Zugriff ohne die Einwilligung des Nutzers möglich ist. Insbesondere für Fahrer, die sich ein Auto mit anderen Fahrern teilen, oder Kunden von Autovermietungen wäre dies sehr hilfreich. Ein PDV kann im Fahrzeug installiert werden (im speziellen Fall, dass das Fahrzeug nur von einem Fahrer verwendet wird) oder idealerweise vom jeweiligen Fahrer in das verwendete Auto mitgebracht werden. Das PDV sollte Hardware verwenden, die die gespeicherten Daten gut schützen kann und könnte die erste Version eines vertrauenswürdigen Datenspeichers sein. Eine Kombination mit anderen persönlichen Geräten wie Mobiltelefonen wäre eventuell in Zukunft möglich; zunächst aber müssen diese Geräte sicherer werden und besser in der Lage sein, sich selbst zu schützen, insbesondere gegen Angriffe, um Daten von außen auszulesen. Verwandte Konzepte existieren für die Berechnung von Straßenmaut, beispielsweise [13] und Pay-as-you drive-Versicherungen wie beispielsweise [14].
- Wenn nicht „nur“ PII des Benutzers des Autos, sondern auch Daten von anderen Parteien wie z. B. der Umgebung gespeichert werden, sollte das Vier- oder n-Augen-Prinzip zur Zugriffskontrolle angewendet werden.
- In Use-Case 2 sind Verkehrszentralen oder andere Entitäten in die Auswahl von Parkplätzen involviert. Diese Entitäten sollten Fahrer oder Mitfahrer nicht nach allen möglichen Prioritäten zu Parkplätzen und Routen ausfragen, sondern stattdessen Optionen anbieten, aus denen die Benutzer oder ein lokales Assistenzsystem wählen können. Dies reduziert das Risiko einer zentralen Verarbeitung von Einstellungen der Benutzer in Bezug auf Preise und ortsbezogene Präferenzen.

2. Anonymisierung

Informationen, die zu einem gerechtfertigten Zweck erfasst werden, müssen nicht zwingenderweise so erfasst werden, dass das entsprechende Individuum identifizierbar ist. Selbst wenn die Informationen so erfasst werden, dass Individuen identifiziert werden können, müssen sie nicht auf diese Art und Weise weiterverarbeitet werden. Dies gilt insbesondere für jegliche Informationen, die nur in aggregierter Form benötigt werden:

- Verkehrs- und Stauanalysen müssen keine individuellen Autos oder gar Fahrer identifizieren.
- Die Interaktion zwischen Peers, etwa mit anderen Fahrzeugen Daten zur Verkehrssicherheit auszutauschen, benötigt keine Identifikation (s. die Diskussion unter 1. „Dezentrale Ansätze“ weiter oben).
- Nicht einmal die Zugriffskontrolle für Autos (z. B. die Entscheidung über den Zugriff auf Parkplätze) benötigt eine individuelle Identifizierung der Autos. Die Konzepte Partieller Identitäten (ISO/IEC 24760-1, [15]) und Privatsphärenfreundlicher Attribute Based Credentials [16] erlauben eine Beschränkung der Informationen auf das, was wirklich benötigt wird, beispielsweise in Use-Case 2 auf die zertifizierte Information, dass ein Parkplatz für das autonome Valet-Parken von einem Fahrzeug gebucht wurde. Das Fahrzeug muss sich gegenüber der Zugriffskontrolle des Parkplatzes nicht individuell identifizieren. Die Übertragung eines Tokens, das das Fahrzeug nur dann identifiziert, wenn das Token missbräuchlich mehrfach verwendet wird, ist ausreichend.

3. Systematische Löschung von PII

Die Löschung von Daten wird häufig in Konzepten und Lebenszyklusmodellen von IKT-Systemen vernachlässigt. Insbesondere im Fall von PII kann dies zu gefährlichem Missbrauch und entsprechenden Haftungsrisiken führen. Aus diesem Grund sollten bereits Architekturentwürfe in jedem Fall Konzepte zur systematischen Löschung von Daten beinhalten. Dies erfordert eine sorgfältige Überlegung, wie lange welche Daten zu welchem Zweck vorgehalten werden müssen. Beim Deutschen Institut für Normung (DIN) und auch in der ISO/IEC-Normung wurden Projekte zur Löschung von Daten diskutiert und teilweise gestartet (s. [17]). Diese Initiativen basieren zu einem großen Teil auf dem Konzept der Datenlöschung im Mautsystem Toll Collect für Lkw.

24.6 Was muss auf lange Sicht hin bedacht werden?

Es sieht danach aus, dass die Infrastrukturen für autonomes Fahren sehr groß und komplex werden und daher ein größerer Zeitraum für jede Planung zur Einführung, Verwendung und Wartung zu berücksichtigen ist. Daher sollten Anmerkungen zur längerfristigen Erfahrung im Bereich ICT und Datenschutz hilfreich sein:

1. Schleichende Erweiterungen des Anwendungsbereiches

Hat sich eine technische Infrastruktur erst einmal für einige Anwendungen etabliert, können neue zusätzliche Anwendungen recht einfach auf derselben Technologie und Infrastruktur aufbauen. Damit können sich neue Datenschutzrisiken schnell einschleichen, speziell wenn die neuen zusätzlichen Anwendungen weitere PII verarbeiten. Dies hat sich z. B. beim Mobilkommunikationsnetz GSM gezeigt, das viele mächtige Funktionalitäten (z. B. Lokalisierung) besitzt, deren De-facto-Einführung und -Nutzung in manchen Ländern aber in einer Grauzone stattfand. Ähnliche Ängste bestehen für Mautsysteme und deren Überwachungsinfrastrukturen, die in mehreren Fällen nur für Lkw oder andere überwiegend beruflich genutzte Fahrzeuge etabliert wurden. Eine Erweiterung auf privat genutzte Fahrzeuge ist dann oft sehr einfach zu realisieren.

2. Schleichende Übergänge von Test-Systemen zu Wirksystemen

Erfahrungen der internetorientierten Softwareentwicklung zeigen, dass der Schritt von einem Test-System oder gar einem experimentellen Prototypen mit reduzierten oder gar keinen Datenschutz- und Datensicherheitsvorkehrungen zu einem Wirksystem heutzutage sehr einfach ist, etwa durch das Ändern eines Weblinks in einem öffentlichen Portal, damit der Link auf ein neues Backend-System zeigt. Eine solche Änderung kann dazu führen, dass Testsysteme zu Wirksystemen werden, obwohl sie noch lange nicht angemessen geschützt sind. Insbesondere Projekte, die unter Ressourcenknappheit leiden und einen schnellen Erfolg benötigen, können dieser Versuchung erliegen.

3. Verbindliche pseudo-eindeutige Identifizierung

Mehr und mehr Computer speichern und verteilen Identifikatoren, die diese Geräte als mehr oder weniger einmalig und vertrauenswürdig identifizieren. Ein Beispiel hierfür ist die GSM International Mobile Station Equipment Identity (IMEI). Theoretisch ist die IMEI ein eindeutiger Identifikator für jedes Mobilkommunikationsgerät. Praktisch gesehen kann diese IMEI aber manipuliert werden. Ähnlich ist es in internetorientierten Netzen bei der Media Access Control Address (MAC-Adresse), die jeder Netzwerkschnittstelle als theoretisch eindeutiger Identifikator zugeteilt ist. Beide Identifikatoren sind auch für Fahrzeuge, die mit entsprechenden Kommunikationstechnologien ausgestattet sind, einschlägig. Während diese Identifikatoren zur Identifizierung von Angreifern sehr wenig nutzen, weil sie recht einfach manipuliert werden können, machen sie (inoffizielle) Datensammlungen sehr einfach und schaffen dadurch ein erhebliches Datenschutzproblem. Ferner wecken sie einen wiederkehrenden „Appetit“ interessierter Parteien auf mehr Identifikation von Benutzern in Kommunikationsnetzwerken oder bei Internetdiensten. Im Interesse eines effektiven Datenschutzes muss dieser Trend erkannt, berücksichtigt und überwunden werden [18].

24.7 Fazit

Man könnte annehmen, dass ein höheres Maß an Autonomie beim Fahren zu mehr Datenverarbeitung und dadurch auch zu mehr Überwachung führen würde. Tatsächlich ist dies aber nicht notwendigerweise der Fall. Die hauptsächlichen Faktoren, die zur Erfassung und Verbreitung zusätzlicher Daten beim autonomen Fahren führen, sind:

1. Die Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrer(n), Passagier(en) und gegebenenfalls Eigentümer(n) wird intensiver, was zur Speicherung und Verarbeitung zusätzlicher Daten führt.
2. Die Interaktion des Fahrzeugs mit anderen Entitäten, insbesondere Verkehrszentralen, wird intensiver, was zu zusätzlichen Übermittlungen potenziell sensibler Daten aus dem Fahrzeug heraus führt.

Ein autonom fahrendes Fahrzeug, das so autonom fährt, dass es nicht mit dem Fahrer zu interagieren braucht, muss nicht mehr Daten von einem Fahrer erfassen als ein herkömmliches Auto. Auch wenn das Fahrzeug in der Lage ist, autonom durch den Verkehr zu navigieren, würde es nicht mehr Daten kommunizieren als irgendein anderes Auto. Gegebenenfalls würde es sogar weniger Daten kommunizieren als ein herkömmliches Auto, das ein zentralisiertes Navigationssystem einsetzt und unter Überwachung steht, beispielsweise durch ein System, das fortwährend die Geokoordinaten des Fahrzeugs sammelt.

Natürlich können einige der realitätsnahen Zwischenszenarien, wie z. B. der Kontrollübergang an den Fahrer in kritischen Situationen (s. z. B. Use-Case 1) in Kombination mit einer zentralisierten Überwachung in solchen kritischen Situationen zu mehr Überwachung und dann auch zu mehr Datenschutzproblemen führen. Während also autonomes Fahren theoretisch nicht zu mehr Datenschutzproblemen führen muss, gibt es eine realistische Bedrohung, dass in der Praxis genau das passiert, wenn Entwurf und Architektur der Systeme Datenschutzprobleme nicht sorgfältig verhindern.

Daher ist ein Privacy-by-Design-Ansatz für autonomes Fahren und die einschlägigen Szenarien nötig. Zumindest die folgenden Fragen müssen gründlich geprüft werden:

- Ist die Erfassung, Verarbeitung und Übermittlung von Daten wirklich notwendig, um eine tatsächliche Verbesserung der Fahrsituation zu erreichen?
- Ist dieser Vorteil die zusätzlichen Datenschutzrisiken wert?
- Können die PII-Stakeholder (häufig Fahrer, Fahrgäste, Eigentümer) ertüchtigt werden, in einem möglichen Dilemma zwischen mehr Funktionalität oder mehr Verkehrssicherheit auf der einen Seite und weniger Privatsphäre auf der anderen Seite informiert und selbstständig zu entscheiden?
- Bleiben die Daten unter Kontrolle der PII-Stakeholder, oder verlassen sie deren Einflussbereich?

Es gibt eine klare Herausforderung, die Freiheit, die seit langer Zeit mit dem Automobil verbunden wird und ein Grund für seinen Erfolg ist, zu schützen.

Ein mögliches Alleinstellungsmerkmal für die etablierte Automobilindustrie und vor allem für Premium-Hersteller und -Marken ist es, nicht einfach dem Trend der Internetunternehmen zu folgen und Informationen überallhin fließen zu lassen, bis man vom Regulator oder empörten Kunden gestoppt wird, sondern einen hinreichenden Privatsphärenschutz für ihre Kunden zu ermöglichen. Gerade die Automobilindustrie hat in anderen Bereichen wie der Reduktion des Energieverbrauchs gezeigt, dass man primitive Lösungen nicht akzeptieren muss, sondern negative Auswirkungen überwinden und Ressourcen schonen kann, indem man sorgfältig plant und entwickelt. Über kurz oder lang wird dieser Ansatz in jedem Fall angeregt oder gefordert werden.

Danksagung

Dank gebührt Tim Schiller, Jetzabel Serna-Olvera und Markus Tschersich für hilfreiche Hinweise und Kommentare und Marvin Hegen und Markus Tschersich für die Hilfe bei der Übersetzung ins Deutsche.

Literatur

1. Helmut Käutner, Ernst Schnabel: In jenen Tagen; Camera-Filmproduktion 1947; mehr Information unter http://de.wikipedia.org/wiki/In_jenen_Tagen_%281947%29; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
2. Angelina Göb: "Nimm Zwei – Carpool Lanes"; 2013-08-06; www.urbanfreak.de/carpool-lanes/; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
3. Telematics News: eCall in German privacy debate; veröffentlicht: 01 February 2012; http://telematicsnews.info/2012/02/01/ecall-in-german-privacy-debate_f3011/; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
4. Jan Philipp Albrecht: eCall – Überwachung aller Autofahrten muss gestoppt werden; www.greens-efa.eu/ecall-11553.html; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
5. European Parliament: Decision of the European Parliament and of the Council on the deployment of the interoperable EU wide eCall service; P7_TA-PROV(2014)0359; <http://www.europarl.europa.eu/RegistreWeb>; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
6. Deutsche Bundesregierung: Verordnung über die technische Umsetzung von Überwachungsmaßnahmen des Fernmeldeverkehrs in Fernmeldeanlagen, die für den öffentlichen Verkehr bestimmt sind (18. Mai 1995, BGBl. I S. 722)
7. Eric Schmidt, Jared Cohen: The New Digital Age: Reshaping the Future of People, Nations and Business; Alfred A. Knopf 2013, ISBN-10: 0307957136
8. ISO/IEC 29100:2011 Information technology – Security techniques – Privacy framework, First edition, 2011-12-15, kostenlos via <http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html>
9. 52. Deutscher Verkehrsgerichtstag 2014, 29. bis 31. Januar 2014 in Goslar, Arbeitskreis VII: Wem gehören die Fahrzeugdaten? www.deutscher-verkehrsgerichtstag.de/images/pdf/empfehlungen_52_vgt.pdf; zuletzt aufgerufen 2014-08-29

10. Bundesverfassungsgericht: Volkszählungsurteil: Urteil v. 15. Dezember 1983, Az. 1 BvR 209, 269, 362, 420, 440, 484/83; www.servat.unibe.ch/dfr/bv065001.html und Mitglieder des Bundesverfassungsgerichts (Hrsg.): Entscheidungen des Bundesverfassungsgerichts. 65, Mohr, Tübingen, S. 1–71, ISSN 0433-7646
11. Wikipedia: Global surveillance disclosures (2013–present); http://en.wikipedia.org/wiki/Global_surveillance_disclosure; zuletzt aufgerufen 2014-08-14
12. Kai Rannenberg: Multilateral Security – A concept and examples for balanced security; Pp. 151–162 in: Proceedings of the 9th ACM New Security Paradigms Workshop 2000, September 19–21, 2000 Cork, Ireland; ACM Press; ISBN 1-58113-260-3
13. Josep Balasch, Alfredo Rial, Carmela Troncoso, Christophe Geuens, Bart Preneel, and Ingrid Verbauwhede: PrETP: Privacy-Preserving Electronic Toll Pricing. Pp. 63–78 in Proceedings of the 19th USENIX Security Symposium, USENIX, 2010
14. Carmela Troncoso, George Danezis, Eleni Kosta, Josep Balasch, and Bart Preneel: PriPAYD: Privacy Friendly Pay-As-You-Drive Insurance. Pages 742–755 in IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing – IEEE TDSC 8(5), IEEE, 2011
15. ISO/IEC 24760-1:2011 Information technology – Security techniques – A framework for identity management – Part 1: Terminology and concepts, First edition, 2011-12-15, kostenlos via <http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html>
16. Ahmad Sabouri, Ioannis Krontiris, Kai Rannenberg: Attribute-based credentials for Trust (ABC4Trust); Pp. 218–219 in Simone Fischer-Hübner, Sokratis K. Katsikas, Gerald Quirchmayr (Eds.): Trust, Privacy and Security in Digital Business – 9th International Conference, TrustBus 2012, Vienna, Austria, September 3–7, 2012; Springer Lecture Notes in Computer Science ISBN 978-3-642-32286-0; siehe auch www.abc4trust.eu
17. Volker Hammer, Karin Schuler: „Leitlinie zur Entwicklung eines Löschkonzepts mit Ableitung von Löschfristen für personenbezogene Daten“, Version 1.0.2, Stand 25. Oktober 2013; www.bfdi.bund.de/SharedDocs/Publikationen/Arbeitshilfen/DINLoeschkonzeptLeitlinie.pdf
18. Kai Rannenberg: Where Security Research Should Go in the Next Decade. Pp. 28–32 in Willem Jonker, Milan Petkovic (Eds.): Secure Data Management – 10th VLDB Workshop, SDM 2013, Trento, Italy, August 30, 2013, Post-Proceedings; 2014; Springer Lecture Notes in Computer Science 8425, ISBN 978-3-319-06810-7

Recht und Haftung

Tom Michael Gasser

Die Beiträge im Teil „Recht und Haftung“ richten den Blick aus einer übergeordneten Perspektive auf die jeweilige Bedeutung verschiedener Rechtsordnungen für ein gesellschaftliches Ordnungsgefüge, das autonomes Fahren ermöglicht. Der Blickwinkel ist hierbei geprägt von und teilweise limitiert auf die Kenntnis der Autoren vor allem des amerikanischen und deutschen Rechtssystems sowie der Praxis in Automobilunternehmen. Zumeist werden aber übergeordnete Aspekte der jeweiligen Rechtssysteme, Grundwerte der Gesellschaftsordnungen und voraussichtlich langfristig fortdauernde Rechtsinstitute und Interessen in den Blick genommen. Dies ermöglicht es, Schlussfolgerungen zu ziehen, die dem zukunftsgerichteten Thema gerecht werden. Auch angesichts dieses abstrakten Ansatzes sei für den vorliegenden Teil gleichwohl darauf verwiesen, dass die geäußerten Rechtsansichten allesamt die der Verfasser auf dieses Zukunftsthema sind und eine rechtliche Beratung im Einzelfall nicht werden ersetzen können.

Um die Herausforderungen des vorliegend betrachteten Fernziels autonomen Fahrens zu verstehen, muss man sich bewusst machen, dass das „eigenständige maschinelle Wirken“ im öffentlichen Straßenverkehr nur in wenigen Rechtsordnungen bislang mit der alltäglichen Rechtswirklichkeit eindeutig übereinstimmt – das gilt auch für einzelne proaktiv regulierende Bundesstaaten in den Vereinigten Staaten. Auch wenn es nämlich regelmäßig den geschulten Blick des Experten bedarf, um dies zu erkennen, setzen heutige prototypische Systeme bei hohen Automatisierungsgraden doch zumeist noch aus technischen Gründen einen Fahrer als Überwacher voraus. In der Abkehr von diesem eingeführten und breit akzeptierten fahrerischen Handeln bei der Fahrzeugsteuerung liegt (nicht nur) unter rechtlichen Gesichtspunkten die leitende Herausforderung autonomen Fahrens. Herausgearbeitet und aufgezeigt werden in den Beiträgen des vorliegenden Teils die Ursachen für bestehende rechtliche Unsicherheiten, die dieser Wandel mit sich bringt. Teilweise lassen sich weiterführende Fragen identifizieren, die gegebenenfalls helfen können, auftretende Veränderungen besser zu verstehen. Aber auch Strategien und Empfehlungen werden abgeleitet, die ihnen Rechnung tragen und den Wandel wesentlich erleichtern können.

Im Beitrag *Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge* geht Tom Gasser vertieft ein auf die grundlegende Betrachtung des heutigen Straßenverkehrs und seiner Gefahren, die vor dem Hintergrund des Menschenrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit dargestellt werden. Hierauf basierend wird aufgezeigt, dass der grundlegende Wandel auf dem Weg zum autonomen Fahren darin liegen wird, vom fahrgesteuerten Fahrzeug zu einem eigenständigen maschinellen Wirken im öffentlichen Raum überzugehen, ohne dass Gefahren sich hierbei gänzlich werden ausschließen lassen. Diesen Systemwechsel ordnet der Verfasser vor dem verfassungsrechtlichen Hintergrund als wesentlich ein. Fortgesetzt wird die Betrachtung der rechtlichen Auswirkungen autonomen Fahrens anhand des resultierenden Automatisierungsrisikos und des gedanklichen Modells von „Dilemma-Situationen“. Hieraus ergeben sich grundlegende Anforderungen an die Gestaltung autonomer Steuerungsfunktionen beim Schutz von Fußgängern und Radfahrern wie auch weitere Forschungsfragen bei der Bestimmung von Ursachen für das Zustandekommen von Verkehrsunfällen im heutigen System des Straßenverkehrs. Ein vertieftes Verständnis dieser Kausalabläufe kann nach Ansicht des Verfassers zu weiterführenden Erkenntnissen im Rahmen der sicheren Gestaltung autonomen Fahrens führen. Neben einigen weiteren Spezialfragen wird vor allem auf die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern im Straßenverkehr eingegangen. Auch hier zeigt sich für das vorliegend betrachtete Fernziel autonomer Fahrzeugführung der Bedarf an grundlegend neuen Konzepten.

Die Produkthaftung in den Vereinigten Staaten steht im Mittelpunkt des Beitrages *Product Liability Issues in the U.S. and Associated Risk Management* von Stephen Wu. Das Risikomanagement von Produkthaftung ist eine wichtige Herausforderung, der sich die Automobilindustrie und andere in diesem Bereich tätige Unternehmen stellen müssen, wenn sie darauf abzielen, autonome Fahrzeuge in den Vereinigten Staaten zu verkaufen. Hersteller autonomer Fahrzeuge können dabei ganz erheblichen, möglicherweise sogar existenziellen Risiken ausgesetzt sein. Lebhaft dargestellten von Produkthaftungsfällen im Automobilbereich aus den vergangenen Jahrzehnten zeigen das abstrakt erscheinende Risiko und die auslösenden Faktoren auf. Dieser Überblick macht die Risiken greifbar und anschaulich. Vor diesem Erfahrungshintergrund werden Empfehlungen für das produkt haftungsrechtliche Risikomanagement im Entwicklungs- und Absicherungsprozess hergeleitet. Der Hersteller kann Risiken durch eine sorgfältige Vorbereitung auf mögliche Produkthaftungsfälle minimieren.

Ausgehend von einer abstrakten Betrachtung von Risiken und Unsicherheiten, die sowohl autonome als auch heutige Fahrzeuge aufwerfen, wird die erhebliche Herausforderung dargestellt, die eine Regulierung konkret bedeutet. Im Ergebnis des Beitrages *Regulation and the Risk of Inaction* kommt Bryant Walker Smith so zu insgesamt acht handlungsleitenden Empfehlungen strategischer Art – vorwiegend bezogen auf die öffentliche Hand, aber auch für betroffene private Akteure im Umfeld autonomen Fahrens. Diese Strategien können entweder den Risiken selbst oder nachteiligen Folgen und Auswirkungen autonomen Fahrens wirksam begegnen. Argumentativ stützt er seinen innovationsoffenen Ansatz dabei auf Chancen, die eine Fahrzeugautomatisierung bieten kann. Eine

seiner grundlegenden einleitenden Feststellungen im Zusammenhang mit Regulierung ist dabei bestimmt durch ihre Notwendigkeit: Werden Entscheidungen in den handlungsleitenden Bereichen nicht von den für eine abstrakte Entscheidung Verantwortlichen getroffen, kommt es lediglich zur Verlagerung im konkreten Einzelfall einer Risikoverwirklichung: So werden sich dann Gerichte mit derselben Fragestellung auseinandersetzen müssen.

Die *Berücksichtigung technischer, rechtlicher sowie ökonomischer Risiken beim Entwicklungs- und Freigabeprozess automatisierter Fahrzeuge* ist Gegenstand des Beitrages von Thomas Winkle. Aus langjährigem Expertenwissen wird die positive technische Entwicklung der Fahrzeugsicherheit über die vergangenen Jahrzehnte nachgezeichnet. Einer höheren Sicherheit und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge stehen diesbezüglich gestiegene Verbrauchererwartungen gegenüber. Diese Erwartungen und Anforderungen an den Automobilhersteller werden auch anhand der höchstrichterlichen Rechtsprechung zur Produkthaftung aufgezeigt und belegt. Hingewiesen wird aber insbesondere auf die mittelbaren ökonomischen Auswirkungen von Produktkrisen auf den Fahrzeughersteller, die in Form des Vertrauensverlustes von Kunden noch wesentlich schwerer wiegen können. Herausgearbeitet werden die tatsächlichen Möglichkeiten des Herstellers, über den Entwicklungs- und Freigabeprozess von Fahrzeugen auf die Fahrzeugsicherheit einzuwirken. Hierbei wird die Erarbeitung nicht nur neuer Ansätze in Bezug auf neue Sicherheits- und Testkonzepte gesehen, sondern vor allem die Empfehlung eines international abgestimmten Leitfadens, der – aufbauend auf dem entsprechenden Instrument zur sicheren Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen – in gleicher Weise für automatisierte Fahrzeuge empfehlenswert erscheint. Abschließend wird im historischen Rückblick auf die ersten Schritte des Automobils dargelegt, wie ein übertriebener Perfektionismus die Einführung einer Innovation verhindern kann. Als Schlussfolgerung wird deshalb die gewissenhafte und sorgfältige Anwendung vorliegender Expertenerfahrung als innovationsfreundlicher Ansatz bei der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge dargestellt.

Tom Michael Gasser

Inhaltsverzeichnis

25.1 Einleitung 544

25.2 Bisherige Arbeiten und Vorüberlegungen 545

25.3 Ausgangssituation des heutigen Straßenverkehrs 546

25.4 Einordnung autonomen Fahrens 549

 25.4.1 Aktueller Stand marktverfügbarer Fahrerassistenzsysteme 549

 25.4.2 Autonomes Fahren 551

25.5 Grundsätzliche Rechtsfragen des autonomen Fahrens 551

 25.5.1 Automatisierungsrisiko 552

 25.5.2 „Dilemma-Situationen“ 554

 25.5.3 Möglichkeit zur Übersteuerung durch die Passagiere 559

 25.5.4 Fehlerkompensationsfähigkeit beim autonomen Fahren 560

 25.5.5 Kommunikation im Straßenverkehr 561

 25.5.6 Regelübertretung 564

25.6 Spezielle Rechtsfragen autonomen Fahrens 565

 25.6.1 Ordnungsrechtliche Bewertung fahrerloser Fahrzeuge 565

 25.6.2 Bewertung autonomen Fahrens nach dem Haftungsrecht im Straßenverkehr 567

 25.6.3 Bewertung nach dem Produkthaftungsrecht 568

 25.6.4 Mögliche Abweichungen der rechtlichen Bewertung im internationalen Kontext . 570

 25.6.5 Sonderfrage: Aufsichtspflicht über Insassen autonomer Fahrzeuge 571

25.7 Fazit 572

 Literatur 573

T.M. Gasser (✉)
Bundesanstalt für Straßenwesen, Deutschland
gasser@bast.de

25.1 Einleitung

Das Projekt „Autonomes Fahren im Straßenverkehr der Zukunft: Projekt Villa Ladenburg“ der Daimler und Benz-Stiftung nimmt Automatisierungsgrade in den Blick, die erst in fernerer Zukunft technisch umsetzbar werden. Die Bearbeitung der aufgeworfenen Rechtsfragen im vorliegenden Kapitel basiert daher wesentlich auf der Beschreibung von Use-Cases (s. Kap. 2), die erst die für eine Bewertung in einzelnen Punkten notwendige Konkretisierung vornehmen. Unsicherheiten in der Prognose zukünftiger technischer Ausgestaltung sind zu erwarten und werden sich in entsprechendem Maße auf die Annahmen und Schlussfolgerungen dieses Kapitels auswirken. Die resultierende Unsicherheit ist dennoch unvermeidbar, will man wichtige zusammenhängende Fragestellungen voranbringen. Dieses Kapitel versteht sich deshalb vor allem als Diskussionsbeitrag zu den gesellschaftlichen Aspekten automatisierten Fahrens aus einem rechtlichen Blickwinkel und nicht als Rechtsgutachten. Es wird vorwiegend die Situation nach dem in Deutschland aktuell geltenden Recht betrachtet. Die geäußerten Rechtsansichten sind die des Verfassers und beruhen auf neun Jahren Tätigkeit im Bereich der Forschung zu Fahrerassistenzsystemen.

Die im vorliegenden Projekt betrachtete gesellschaftliche Dimension autonomer Fahrzeuge geht nach dem zugrunde gelegten Verständnis weit über die aktuell in Deutschland geforderte Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen hinaus. Nachfolgend wird eine besondere Fragestellung der „gesellschaftlichen Akzeptanz“ im Zusammenhang mit den Rechtsfragen von autonomen Fahrzeugen konkretisiert. Sie ist nicht auf den ersten Blick erkennbar und deckt nur einen Ausschnitt des nochmals weiteren Verständnisses im Projekt ab (s. hierzu Kap. 29).

Autonome Fahrzeuge werden sich voraussichtlich nur dann durchsetzen können, wenn ihr gesamtgesellschaftlicher Nutzen den Schaden überwiegt, der mit ihnen einhergeht [1]. Diese frühe, im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen aufgestellte These kann in Bezug auf den herausragend wichtigen Belang der Verkehrssicherheit aufgefasst werden. Die Anforderung wäre bereits dann erfüllt, wenn sich die Verkehrssicherheit insgesamt gesehen durch eine entsprechende Weiterentwicklung der Fahrzeuge verbessern würde (was allerdings nicht zwangsläufig gesellschaftliche Akzeptanz zur Folge hat (s. Kap. 29). Hierzu ist bereits heute absehbar, dass autonome, von maschineller Umfeldwahrnehmung abhängig gesteuerte Fahrzeuge nicht völlig fehlerfrei steuern werden. Entsprechend ist zu schlussfolgern, dass es auch im Fall autonomer Fahrzeuge einzelne schwerwiegende Schadensereignisse weiterhin geben dürfte, bei denen im Extremfall mehrere Menschen ihr Leben verlieren werden. Gesellschaftliche Akzeptanz autonomer Fahrzeuge ist deshalb notwendig damit verbunden, dass die Konsequenzen dieser Entwicklung von der Gesellschaft mitgetragen werden. Aus der rechtlichen Perspektive lässt sich zeigen, dass es hierbei ganz grundlegend darum geht, das „Wirken autonomer Fahrzeuge“ im öffentlichen Raum, im Sinne einer eigenständigen maschinellen „Handlung“ ebendort, zu verstehen und zu akzeptieren. Dieser Zustand im Straßenverkehr wäre tatsächlich völlig neuartig (auch andere Verkehrsmittel wie automatisierte, führerlose Bahnen setzen zumeist konsequent den Trennungsgedanken zwischen maschineller Steuerung und öffentlichem Raum mittels

physischer Barrieren um; es existieren soweit ersichtlich sehr wenige Ausnahmen¹, die dann aber den Ausschluss resultierender Gefahren nahezu lückenlos über ein Sicherheitskonzept mit einigem Aufwand verfolgen (vgl. [2]).

Dass ein Wirken autonomer Fahrzeuge im öffentlichen Raum des Straßenverkehrs neuartig ist, lässt sich aus rechtlicher Sicht – wie nachfolgend der Versuch unternommen wird – aufzeigen, um deutlich zu machen, dass die gesellschaftliche Akzeptanz einer derart tiefgreifenden Veränderung sich tatsächlich einstellen muss (s. Kap. 30), bevor sie in die Anpassung entsprechender Vorschriften einfließen kann.

25.2 Bisherige Arbeiten und Vorüberlegungen

Soweit erkennbar, wurde erstmals anlässlich eines Arbeitstreffens im Oktober 2002 durch Homann [1] die Frage nach gesellschaftlicher Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung bearbeitet. Die Inhalte dieser Arbeit lassen sich auf die vorliegende Fragestellung autonomer Fahrzeuge übertragen. Es bleibt lediglich festzuhalten, dass die bereits damals für „Fahrerassistenzsysteme neuer Generation“ diskutierte gesellschaftliche Akzeptanz bislang nicht als „Problem“ im Bewusstsein der Bevölkerung verankert ist, obwohl die seinerzeit diskutierten Systeme inzwischen längst marktfähig geworden und hinreichend verbreitet sein dürften, um ein existentes Problem – soweit überhaupt eines besteht – erkennbar werden zu lassen. Dies ist voraussichtlich darauf zurückzuführen, dass bislang spektakuläre negative Effekte durch solche Systeme (wie beispielsweise im Fall von Notbremsassistenten denkbar) nicht verzeichnet werden. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Systeme tatsächlich (nahezu) fehlerfrei arbeiten. Ein differenzierter Erklärungsansatz wird aber sein, dass entsprechende Eingriffe in die Fahrzeugführung nur ausgesprochen kurzfristig und in sehr unfallnahen Situationen erfolgen. So wird technisch eine Auslegung möglich, die ausschließlich dann eingreift, wenn die Auswertung der Umfelderkennung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ergibt, dass ein Eingriff tatsächlich erforderlich ist – negative Effekte werden so auf ein Minimum begrenzt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Fahrer weiterhin in der Pflicht bleibt, alle erforderlichen Steuerungshandlungen selbst auszuführen. Dadurch steht der Fahrer potenziell in allen Fällen der Nichtauslösung als umfassende Rückfallebene zur Verfügung. Es ergibt sich somit die untergeordnete Bedeutung solcher Funktionen nicht nur in Bezug auf den zeitlichen Anteil am gesamten Steuerungsgeschehen eines Fahrzeuges, sondern auch hinsichtlich der von ihnen zu erwartenden Zuverlässigkeit. Solche Funktionen können deshalb nur sehr eingeschränkt im Zusammenhang mit eigenständiger bzw. autonomer Fahrzeugsteuerung herangezogen werden: Die untergeordnete Bedeutung und ein gegebenenfalls geringes

¹ Projekt RUBIN zur Automatisierung der U-Bahn-Linien U2 und U3 in Nürnberg: Vorübergehend erfolgte der Mischbetrieb von automatisierten und konventionell gesteuerten Zügen auf einer Teilstrecke Rathenauplatz – Rothenburger Straße. Zudem weist das Konzept entlang der Bahnsteige keine physische Trennung, sondern ein sensorbasiertes Bahnsteigsicherungssystem auf.

„Wirkfeld“ einer Funktion führen zur Stärkung der Fahrerrolle. Darin dürfte ein wichtiger Grund liegen, weshalb die Diskussion um die gesellschaftliche Akzeptanz bislang nicht geführt werden musste.

Es spricht allerdings wenig dafür, dass auch im Fall autonomer Fahrzeuge gesellschaftliche Akzeptanz in diesem Sinne keine Rolle spielen wird: Nimmt man die im vorliegenden Projekt zugrunde gelegten stellvertretenden Applikationen als Grundlage (s. Kap. 2), wird deutlich, dass sie einen sehr hohen Automatisierungsgrad aufweisen. Die „maschinelle Fahrfähigkeit“ dieser Applikationen als Bezugsgröße wird konsequenterweise hinsichtlich „Fähigkeiten der Perzeption, Kognition, Verhaltensentscheidung sowie Verhaltensausführung“ (s. grundlegende Definitionen in Kap. 2) näher definiert. Es tritt darin eine maschinelle „Autonomie“ des Fahrzeugs zutage, die es erlaubt, vom „Fahrroboter“ „als Subjekt ... analog zur Rolle des Fahrers in heutigen Fahrzeugen“ (s. Kap. 2) zu sprechen. Damit wird aber bereits deutlich, dass es sich hierbei um einen sehr grundlegenden Wandel handelt, der damit einhergehen wird, solche maschinelle Entscheidungen im öffentlichen Raum einzuführen.

Aus rechtlicher Sicht lässt sich zu der Frage gesellschaftlicher Akzeptanz autonomer maschineller Fahrfähigkeiten nur eingeschränkt etwas beitragen: Was rechtliche Vorschriften allerdings in hohem Maße widerspiegeln dürften, ist, was gesellschaftlich als konsensfähig angesehen werden kann – diese Annahme darf jedenfalls dann als gerechtfertigt gelten, wenn einzelne Vorschriften nicht in breiten Kreisen der Öffentlichkeit kritisch diskutiert und hinterfragt werden. Entsprechend lässt sich mittels Gegenüberstellung von autonomen Fahrzeugen mit geltendem Recht darstellen, dass nach dem Sinn und Zweck der Vorschriften gerade nicht eigenständiges „Wirken“ von Maschinen im öffentlichen Raum (verstanden im Sinne von Verhaltensentscheidung und Verhaltensausführung als neuartige Prägung maschinellen Wirkens, s. o.) umfasst ist.

Gesetze sollen abstrakt-generell auf beliebige Lebenssachverhalte anwendbar sein. Diesem Anspruch genügen auch die Vorschriften des Straßenverkehrsrechts grundsätzlich. Wenn allerdings Veränderungen der Lebenswirklichkeit eintreten, die dazu führen, dass vormals zugrunde gelegte Annahmen sich als nicht mehr gültig herausstellen, wie dies durch das Hinzutreten autonomer Fahrzeuge mit Entscheidungswirkung im öffentlichen Raum der Fall sein würde, kann dies über eine Rechtsanwendung nur dargestellt werden. Möglich ist insoweit, die eintretende Veränderung präzise zu beschreiben und die übergeordneten Grundwerte unserer Gesellschaft – wie die Grundrechte – argumentativ heranzuziehen, die den Rahmen beschreiben können, der voraussichtlich die Veränderungen überdauern wird und für die Entwicklung insgesamt maßgeblich ist.

25.3 Ausgangssituation des heutigen Straßenverkehrs

Grundlegende staatliche Pflichten lassen sich auch im Bereich von Straßenverkehrsunfällen auf die Verfassung zurückführen. Aufgrund der mit dem Straßenverkehr verbundenen Gefahren stehen vor allem die Grundrechte auf Leben und körperliche Unversehrtheit

(geschützt durch Art. 2 Abs. 2 Satz 1 Grundgesetz (GG)) im Mittelpunkt. Der sachliche Schutzbereich des Grundrechts auf Leben umfasst den Schutz jedes Menschen („Jedermanngrundrecht“) nicht nur vor gezielter Tötung, sondern auch vor Verhaltensweisen, die unbeabsichtigt (ungewollte Eingriffe wie beispielsweise Unfallfolgen) den Tod herbeiführen. Dabei ist die staatliche Schutzpflicht umfassend und gebietet auch Schutz vor rechtswidrigen Eingriffen Dritter. Dies führt in letzter Konsequenz, wenn Eingriffe nicht zu rechtfertigen sind, zur staatlichen Pflicht, ein Verbot solcher Eingriffe – beispielsweise durch den Erlass von Rechtsnormen – sicherzustellen [3].

An dieser Stelle wird eine Diskrepanz zwischen der Lebenswirklichkeit der Gesellschaft und verfassungsrechtlichem Anspruch deutlich. So wird insbesondere darauf hingewiesen, dass „... die Verkehrssicherheit [kaum diskutiert wird], obwohl die immer noch große Zahl von Verkehrstoten und von dauerhaft schwerbeschädigten Unfallopfern dazu allen Anlass gäbe.“ [3] Auch werden schwere Straßenverkehrsunfälle in den Medien regelmäßig nur als Thema von untergeordnetem, regionalem Interesse behandelt. Das sich darin offenbarende Phänomen des heutigen Straßenverkehrs liegt darin, dass die mit ihm verbundenen Gefahren so wenig Aufmerksamkeit erregen und in der gesellschaftspolitischen Diskussion so wenig Raum einnehmen [4], woraus zumindest ein Indiz für eine breite gesellschaftliche Akzeptanz dieses Zustands abgeleitet werden könnte.

Gleichwohl wirkt sich die Schutzpflicht bezüglich der „Risiken der Technik“ auch im Bereich des Straßenwesens ganz erheblich aus. Eine Statistik der (schwerwiegenden) Straßenverkehrsunfälle wird geführt (gemäß § 5 Abs. 3 Straßenverkehrsunfallstatistikgesetz mit einer Aufgabe der Unfallforschung bei der Bundesanstalt für Straßenwesen), sodass eine präzise Überwachung der Verkehrssicherheitsentwicklung und Unfallursachen erfolgen kann (wobei die Entwicklung der Zahl im Straßenverkehr Getöteter seit vielen Jahren insgesamt gesehen rückläufig ist). Die Verkehrssicherheit ist aber weit darüber hinaus eine Größe von entscheidender Bedeutung im (verkehrspolitischen) Handeln, beispielsweise (aber nicht abschließend) bei dem Erlass und der Änderung von straßenverkehrsrechtlichen (fahrerlaubnisrechtlichen, fahrzeugtechnischen, verhaltensrechtlichen und vieler weiterer) Regelungen, aber auch bei Straßenentwurf, Straßenunterhaltung, der Straßenausstattung etc. Trotz dieser vielfältigen Anstrengungen und laufenden Verbesserungen bleibt der bislang erreichte Stand von 3339 Getöteten und 374.142 Verletzten (in Deutschland im Jahr 2013) [5] eine – zwangsläufig unbefriedigende – Realität.

Letztlich stellt sich aus einer sehr grundlegenden rechtlichen Sicht hierbei die Frage nach der verfassungsrechtlichen Rechtfertigung dieser Eingriffe in das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit. Sie lassen sich argumentativ über das mit dem Kraftfahrzeugverkehr einhergehende Mobilitätsbedürfnis anderer Grundrechtsträger und deren Bereitschaft, sich dieser Gefahren um des mit ihnen verbundenen Nutzens willen auszusetzen, herleiten. Auch das ist aber nicht allgemein gültig, insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass die von Kraftfahrzeugen ausgehenden Gefahren aufgrund der erheblichen Betriebsgefahr im Vergleich mit nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern hier keine völlig widerspruchsfreie Argumentation erlaubt: Während bei motorisierten Verkehrsteilnehmern noch damit argumentiert werden kann, dass sie bereit sind, erhöhte Risiken des

Kraftfahrzeugverkehrs zu tragen, die sie selbst schaffen, lässt sich dies nicht auf Fußgänger oder Radfahrer übertragen [3]. Fußgänger und Radfahrer haben gleichwohl mit 557 und 354 Getöteten und 30.807 sowie 71.066 der Verletzten insgesamt (für 2013) [5] einen erheblichen Anteil am gesamten Straßenverkehrsunfallgeschehen in Deutschland.

Gleichwohl erscheint es wahrscheinlich, dass in weiten Teilen der Gesellschaft Konsens dahingehend bestehen dürfte, Konsequenzen des Straßenverkehrs angesichts der Bedeutung für die Mobilität der Gesellschaft zu akzeptieren. Wagt man das gedankliche Experiment, weitreichende Einschränkungen des Kraftfahrzeugverkehrs zum Zwecke einer Verbesserung der Verkehrssicherheit in Erwägung zu ziehen, hieße dies zugleich, einige weitere gesellschaftliche Belange außer Acht zu lassen: Unmittelbar wirksame (radikale) Änderungen gingen offensichtlich mit einer erheblichen Einschränkung individueller (motorisierter) Mobilität einher und im Übrigen auch (aber nicht nur) der allgemeinen Handlungsfreiheit (grundrechtlich geschützt über Art. 2 Abs. 1 GG). Weil ein solcher Ansatz extrem wäre, ist seine Verhältnismäßigkeit infrage gestellt: Entsprechende, geeignete Maßnahmen bei einer Fahrleistung auf Straßen von insgesamt 724 Milliarden Kilometern (in 2013, für Deutschland) [5] zu identifizieren, die nicht in einschneidenden Konsequenzen für die wirtschaftliche Entwicklung des Landes, Berufsausübung, öffentliche Daseinsvorsorge und vieles andere mehr münden, erscheinen kaum denkbar. Eine Mehrheitsfähigkeit für Einschränkungen im Bereich des Kraftfahrzeugverkehrs ist vor diesem Hintergrund unwahrscheinlich. Der derzeit praktizierte Ansatz einer kontinuierlichen Verbesserung der Verkehrssicherheit erweist sich darum – wie die bislang insgesamt positive Entwicklung zeigt – als erfolgreich, realistisch und vorzugswürdig. Der oben aus verfassungsrechtlicher Sicht dargestellte Appell, die Verkehrssicherheit stärker zu diskutieren, stellt auch die bestehende rechtliche Situation des Straßenverkehrs nicht infrage, sondern betont zunächst die Bedeutung der Verkehrssicherheitsarbeit in diesem Zusammenhang.

Führt man aber die Ursachensuche für das im Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln ungünstige Abschneiden des Straßenverkehrs weiter, lohnt es, auf eine sehr grundlegende Besonderheit von Straßen hinzuweisen: Mit der rechtlichen Einordnung von Straßen als „... öffentliche Sachen im Gemeingebrauch ...“, [die] einer unbeschränkten Öffentlichkeit unmittelbar und ohne besondere Zulassung für eine bestimmungsgemäße Benutzung zur Verfügung stehen ...“, mithin die Straße als „Mehrzweckinstitut“ [6], wird treffend eine Eigenschaft hervorgehoben, in der das Verkehrsgeschehen wie wir es heute kennen – und damit auch das resultierende Unfallgeschehen – wurzelt. Straßen stehen als öffentliche Sache im Gemeingebrauch auch keineswegs nur zum Zweck der Ortsveränderung zur Verfügung (sogenannter Verkehr im engeren Sinne), sondern dienen auch dem geschäftlichen und kommunikativen Verkehr (sogenannter Verkehr im weiteren Sinne) [7]. Es ergibt sich in letzter Konsequenz dieser Zweckbestimmung der „Straße“ eine Vielfalt im Verkehrsgeschehen, verstanden im Sinne einer Vielfalt der möglichen Verkehrsteilnehmer, Verkehrsabläufe, plötzlicher, unerwarteter Ereignisse sowie Zustände und Entwicklungen zwischen Verkehrsteilnehmern auf Straßen. Eine vergleichbare Vielfalt möglicher Interaktionen, an denen nahezu die gesamte Bevölkerung in irgendeiner Form teilhat und das mit einem vergleichbaren Verletzungsrisiko verbunden wäre, ist in anderen Lebensbereichen

ohne Beispiel. Die Straße hat damit eine vielfältige Funktion, die bei dem von anderen Verkehrsträgern in Anspruch genommenen Raum zumeist nicht besteht. Diese Funktionsvielfalt wirkt sich im Rahmen der in Betracht zu ziehenden Umstände im Zusammenhang mit Fahrzeugführung ganz erheblich aus: Die Anforderungen an die verkehrssichere Durchführung der Fahraufgabe sind komplex und vielfältig. Vom Kraftfahrer sind die umfassende Wahrnehmung der Verkehrssituation und unmittelbare Entscheidung und Umsetzung in geeignete Handlungen, insbesondere die Gefahrerkennung, gefordert. Diese ordnungsrechtliche Aufgabe wird heute im Wesentlichen mit verhaltensrechtlichen und fahrerlaubnisrechtlichen Vorschriften wahrgenommen. Welche Bedeutung die Vielfältigkeit und Komplexität der Aufgabe bei einer Ausführung durch eine maschinelle Fahrzeugsteuerung in rechtlichen Kategorien entfaltet, wird nachfolgend noch herausgearbeitet.

25.4 Einordnung autonomen Fahrens

Vor diesen Hintergrund tritt im Rahmen des vorliegenden Projektes zum „autonomen Fahren“ die grundlegende und weitreichende Rechtsfrage, wie autonome Fahrzeuge sich in diese Gemengelage rechtlich einfügen könnten. Als Ansatzpunkt einer Beantwortung ist – wie bereits oben ausgeführt – die beschriebene Eigenschaft solcher Fahrzeuge als „Fahrroboter“ bzw. „Subjekt“ analog zum Fahrer (s. Kap. 2) erneut aufzugreifen, auszulegen und hinsichtlich der hiermit verbunden Konsequenzen für die Lebenswirklichkeit darzulegen.

25.4.1 Aktueller Stand marktverfügbarer Fahrerassistenzsysteme

Bislang existiert eine Handlungs- und Entscheidungsqualität ausschließlich im Fall menschlicher Handlung (die immer mindestens in Form eigener fahrerischer Wahrnehmung und Entscheidung vorliegt – zumindest im Sinne einer ständigen Verpflichtung hierzu). Tatsächlich handelt es sich hierbei um das heute noch aktuelle Minimum an fahrerischer Beteiligung bei der Fahrzeugsteuerung: Aktuelle Fahrerassistenzsysteme im weiteren Sinn können den Fahrer nur darin unterstützen, das Fahrzeug zu führen, sie ersetzen ihn aber nicht. So ist nach aktuellem Stand (August 2014) eine Arbeitsteilung zwischen Fahrer und Fahrerassistenzsystem denkbar, die aktiv die Längs- und Querverführung des Fahrzeuges steuern (auf Basis eigener, maschineller Umfeldwahrnehmung). Diese Steuerung besitzt aber gerade keine eigenständige Entscheidungsqualität: Es wird vielmehr jederzeit vorausgesetzt, dass der Fahrer unmittelbar eingreift und die Steuerung des Fahrzeuges sofort wieder übernimmt, wenn dies erforderlich wird – gleich aus welchen Gründen; beispielsweise könnte auch eine fehlerhafte Umfeldwahrnehmung des Systems zugrunde liegen. Damit liegt aber beim Fahrer eine übergeordnete Rolle und Verantwortung, sodass die Fahrzeugsteuerung durch das System nur abgeleitet und untergeordnet erscheint. Aus technischer Sicht der Arbeitsteilung ist dies derzeit auch notwendig, weil im Markt verfügbare Fahrerassistenzsysteme nicht in der Lage sind, das Erreichen aller Systemgrenzen von

sich aus zu erkennen. Entsprechend lautet ein charakteristischer Warnhinweis (von mehreren) in der Instruktion für das System „DISTRONIC PLUS“ (eine adaptive Geschwindigkeitsregelung und damit ein System der Längsführung der Firma Daimler AG) nach Stand August 2014:

WARNUNG

Die DISTRONIC PLUS und der aktive Totwinkel-Assistent sind nur Hilfsmittel, die Sie beim Fahren unterstützen sollen.

Sie können Ihre Aufmerksamkeit nicht ersetzen. Die Verantwortung für den Abstand zu anderen Fahrzeugen, für die gefahrene Geschwindigkeit und für rechtzeitiges Bremsen liegt bei Ihnen. Achten Sie stets auf das Verkehrsgeschehen und Ihre Umgebung. Sie könnten sonst Gefahren zu spät erkennen, einen Unfall verursachen und sich und andere verletzen. [8]

Aus diesem Warnhinweis – der sich auch im Fall anderer heutiger Fahrerassistenzsysteme in vergleichbarer Weise findet – ergibt sich sehr klar, dass das System den Fahrer nur unterstützen kann, während der Fahrer ununterbrochen zu eigener Wahrnehmung der Verkehrssituation (unverändert) angehalten bleibt. Alle durch das System automatisierten Steuerungsvorgänge sind durch den Fahrer zu kontrollieren und gegebenenfalls durch eigene Bedieneingaben zu überstimmen.

Fahrerassistenzsysteme werden darum aus regelungstechnischer Sicht als „redundant-parallel“ Form der Arbeitsteilung von gleichen Aufgaben beschrieben [9]. Diese arbeitswissenschaftliche Beschreibung ist auch vor dem rechtlichen Hintergrund richtig, sagt aber noch nichts darüber aus, wo die Entscheidungsbefugnis im Fall widersprechender Arbeitsausführung liegt. Die Autorität, das Fahrerassistenzsystem jederzeit zu überstimmen, liegt bei Fahrerassistenzsystemen heute immer beim menschlichen Fahrer. Der sich aus den Hinweisen der Bedienungsanleitung (bzw. Instruktion) ergebende bestimmungsgemäße Gebrauch des Systems geht immer dahin, die geeignete Arbeitsausführung des Systems zu beobachten und zu kontrollieren sowie abzuändern, wenn sie in ungeeigneter Weise erfolgt.

Werden die Längs- und die Querverführung eines Fahrzeuges, also die beiden wesentlichen Aspekte der Fahraufgabe hinsichtlich der Steuerungsausführung, zeitgleich automatisiert, wird diese Arbeitsteilung heute als teilautomatisch bezeichnet [10]. Dies ändert aber nichts daran, dass auch solche Systeme nicht in der Lage sind, Systemgrenzen von sich aus zu erkennen und deshalb der redundant-parallelen Wahrnehmung, Entscheidung und Handlung eines menschlichen Fahrers (verstanden als dessen Ausübung von Autorität im Sinne einer „Übersteuerung bei jedem in irgendeiner Weise erkennbaren Bedarf“) notwendig unterliegen. Somit kommt dem Aspekt der „Autorität“ bei einer durch den Fahrer bestimmungsgemäß zu überwachenden Automatisierung die rechtlich entscheidende Bedeutung zu.

Im Ergebnis bleibt daher festzuhalten, dass den bis heute marktverfügbaren Fahrerassistenzsystemen niemals eine eigenständige, sondern ausschließlich eine abgeleitete Handlungs- und Entscheidungsqualität bei der Fahrzeugsteuerung zukommt, die sich unter vollständiger Autorität des Fahrers vollzieht, der sie ständig bestimmungsgemäß überwacht.

25.4.2 Autonomes Fahren

Grundlegend anders stellt sich dies im Fall autonomen Fahrens dar, das mit vier stellvertretenden Applikationen für die vorliegende Bewertung (s. Kap. 2) herangezogen wird. Alle vier Applikationen sehen gleichermaßen einen Fahrroboter vor, der die Fahrzeugsteuerung übernimmt. Selbst die Applikation des „Autobahnautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer – AutobahnpiLOT“, die deutlich an heutige Fahrerassistenzsysteme erinnert, setzt gerade nicht voraus, dass der „Fahrer“ während der automatisierten Fahrt überhaupt noch eine Aufgabe wahrnimmt, die dem heutigen Bild eines „Fahrers“ entspricht. Dies tritt in der eindeutigen Formulierung zutage, der Fahrer werde „... während der autonomen Fahrt zum einfachen Passagier ...“.

Das autonome Fahren sieht damit im Kern vor, dass die redundante Parallelität in der zeitgleichen Aufgabenwahrnehmung durch Fahrer und System zugunsten einer – gegebenenfalls zeitlich und räumlich begrenzten – eigenständigen maschinellen Fahrzeugsteuerung entfällt. Die zutreffend daher nur noch als „Fahrzeugnutzer“ bezeichnete Person hat zwar im Fall der o. g. Applikation „AutobahnpiLOT“ eine als „dominant“ ausgewiesene Eingriffsmöglichkeit in die Fahrzeugsteuerung, die sich grundsätzlich nicht von der in Abschn. 25.4.1 beschriebenen „Autorität“ im Fall von Fahrerassistenzsystemen unterscheidet. Allerdings fehlt es mit einiger Wahrscheinlichkeit an der Grundlage für ihre Ausübung: Sobald sich die Rolle des Fahrers derart verändert, dass nicht nur die Handlungsausführung, sondern auch die eigene Beobachtung der Verkehrssituation und die hierauf beruhende Bewertung maschineller Steuerungsentscheidungen entfällt, wird auch zwangsläufig die Bedeutung dieser „Dominanz“ oder „Autorität“ eingeschränkt sein: Es fehlt auch bei Anwesenheit des Fahrzeugnutzers die Situationswahrnehmung und damit de facto an einer Grundlage für die Ausübung von „Dominanz“ bzw. „Autorität“. Im Fall der beiden Applikationen, die sich durch die räumliche Abwesenheit des Fahrzeugnutzers auszeichnen (s. die stellvertretenden Applikationen „Autonomes Valet-Parken“ und „Vehicle-on-Demand“ in Kap. 2) tritt das Fehlen jeglicher Grundlage für die Ausübung von „Dominanz“ bzw. „Autorität“ noch offensichtlicher zutage.

Das Fehlen einer Grundlage für eine unmittelbare Beobachtung von Verkehrssituationen als Ausgangspunkt einer Fahrzeugsteuerung erlaubt nur den Rückschluss auf eine Eigenständigkeit bzw. „Autonomie“ der maschinellen Steuerung. Die insoweit alles entscheidende Bedeutung der Autonomie maschineller Fahrzeugsteuerung im vorliegenden Zusammenhang hat daher konsequenterweise als adverbiale Bestimmung auch Eingang in den Namen des zugrundeliegenden Projektes gefunden.

25.5 Grundsätzliche Rechtsfragen des autonomen Fahrens

Rechtsfragen im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren lassen sich, wie bereits in Abschn. 25.2 ausgeführt, nicht anhand der heutigen Rechtsgrundlagen zufriedenstellend oder erschöpfend beantworten. Dies begründet sich daraus, dass die Rechtsgrundlagen des

Straßenverkehrsrechts bei ihrer Entstehung und Weiterentwicklung bislang nur Erwägungen zugrunde legen konnten, die zum Regelungszeitpunkt regelungsbedürftig waren. Im Bereich des öffentlichen Straßenverkehrs hat sich die Frage autonomer Fahrzeuge bislang nicht gestellt – auch nicht angesichts heute marktverfügbarer Fahrerassistenzsysteme (s. Abschn. 25.4.1): Es war bislang immer davon auszugehen, dass ein Fahrer die Fahrzeugsteuerung mindestens im Sinne der redundant-parallelen Aufgabenwahrnehmung noch ausführt. Zieht man demgegenüber autonomes Fahren in Betracht, liegt darin ein Wechsel von grundlegender Bedeutung hin zur eigenständigen maschinellen Fahrzeugsteuerung.

25.5.1 Automatisierungsrisiko

Für autonome Fahrzeuge wird angenommen, dass „Hardware-Ausfälle und Software-Fehler ... auch bei autonom fahrenden Fahrzeugen auftreten [können]“, wobei diese „nach aktuellem Stand der Technik“ entwickelten Fahrzeuge als „... mindestens so zuverlässig und sicher ... wie es heutige Fahrzeuge sind“ eingestuft werden. Im Weiteren wird aber zugleich deutlich, dass diesbezüglich noch erhebliche Unsicherheit herrscht, da die „Erfolgsquote“ bei der Fahrzeugführung als „ähnlich der menschlichen Qualität und Erfolgsquote“ angenommen wird, dies aber derzeit eine vorsichtige erste Einschätzung von Experten darstellt, die nur als Diskussionsgrundlage für das vorliegende Projekt dient (s. Kap. 2). Tatsächlich kann also die Leistung maschineller Fahrzeugsteuerung heute noch nicht abschließend beurteilt werden; anzunehmen ist aber, dass einerseits ein Automatisierungsrisiko verbleiben wird, dieses andererseits jedoch nicht höher liegt als das resultierende Risiko menschlicher Fahrzeugführung.

25.5.1.1 Das Automatisierungsrisiko vor dem Hintergrund der Grundrechte

Nimmt man dieses somit für möglich gehaltene Automatisierungsrisiko in den Blick und zieht die Situation bezogen auf das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit im heutigen Straßenverkehr mit heran (s. Abschn. 25.3), wird deutlich, dass der Wandel von menschlich kontrollierter zu eigenständiger, maschineller Fahrzeugsteuerung als „wesentlich für die Verwirklichung der Grundrechte“ angesehen werden dürfte [11]. Aufgrund des erheblichen Eingriffs, den ein solches, neuartiges Automatisierungsrisiko in das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit bedeuten würde, ist es als wahrscheinlich anzusehen, dass eine Entscheidung über die Ermöglichung autonomer Fahrzeuge und damit über ein eigenständiges maschinelles Automatisierungsrisiko im Straßenverkehr dem Gesetzgeber obliegt. Der Gesetzgeber wäre verpflichtet, die wesentlichen Entscheidungen selbst zu treffen, was sich aus dem Demokratieprinzip und Rechtsstaatsgebot ergibt. Die für die Grundrechtsverwirklichung maßgeblichen Regelungen dürften somit nicht dem Handeln und der Entscheidungsmacht der Exekutive überlassen werden [12]. Diese Argumentation stellt die Neuartigkeit eines solchen Automatisierungsrisikos in den Mittelpunkt, weil hiermit die Fahrzeugsteuerung insgesamt revolutioniert würde. Zugleich ist aber einschränkend festzustellen, dass die realistisch zu erwartende Einführung automa-

tisierter Fahrzeugführung allmählich über die immer weitere Verbesserung bereits heute verfügbarer Fahrerassistenzsysteme „stufenweise“ (s. Kap. 2) erfolgt. Damit wird die Frage aufgeworfen, ob der Wandel hin zu maschineller Fahrzeugsteuerung zum Zeitpunkt der Entscheidung hierüber noch als „wesentlich“ anzusehen sein wird. Das Bundesverfassungsgericht ist mit der Anwendung des Parlamentsvorbehaltes im Rahmen der Grundrechte auf Leben und körperliche Unversehrtheit in der Vergangenheit eher zurückhaltend gewesen und hat es genügen lassen, dass ein fraglicher Typus an Lebensrisiko (im konkreten Fall war die „Brüter-Technologie“ Gegenstand) von dem im Atomgesetz zum Ausdruck kommenden gesetzgeberischen Willen umfasst ist [3], [13]. Auch ist nicht erforderlich, dass die Risiken und Folgen des Straßenverkehrs als solche explizit benannt werden, die die Grundrechte auf Leben und körperliche Unversehrtheit einschränken (sodass sich allein hieraus auch heute keine Verfassungswidrigkeit des Straßenverkehrsgesetzes ableitet) [13]. Es bleibt deshalb die Frage, ob das Straßenverkehrsgesetz in der heutigen Form die neuartige maschinelle Steuerungsqualität umfassen kann. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Stand: August 2014) begründet die Neuartigkeit und die Eigenständigkeit der maschinellen Entscheidungsqualität hieran erheblichen Zweifel.

Stellen sich die zugrunde gelegten Annahmen und Bezüge als richtig heraus, wäre die Frage der Ermöglichung eines maschinellen Steuerungsrisikos im öffentlichen Straßenverkehr durch ein formelles Gesetz zu regeln (sogenannter Vorbehalt des Gesetzes). Dem Gesetzgeber stünde es dabei frei, Risiken zuzulassen, die „unterhalb der Gefahrenschwelle“ bleiben und sich deshalb – auch angesichts der Freiheitsausübung des Risikoverursachers – rechtfertigen lassen. Er ist indes nicht hierauf beschränkt und kann auch zur Risikoversorge unterhalb der Gefahrenschwelle tätig werden, soweit dies noch als verfassungsrechtlich verhältnismäßig anzusehen ist [3]. Hinsichtlich des Ausmaßes eines möglichen Automatisierungsrisikos erscheint deshalb – schon aufgrund der Indizwirkung der Situation im heutigen Straßenverkehr – eine Sicherheit und damit auch Regelungsbefugnis des Gesetzgebers durchaus realistisch, die sich im Bereich bewegt, der „mindestens so zuverlässig und sicher ist, wie es heutige Fahrzeuge sind“ (s. Kap. 2).

25.5.1.2 Haftung des Produktherstellers für die eigenständig wirkende automatisierte Fahrzeugsteuerung?

Die Produkthaftung des Herstellers bei vollautomatisierten Systemen (zur Einordnung der vorliegenden Use-Cases als „vollautomatisiert“ s. Kap. 2) könnte wesentlich durch den seitens des Herstellers intendierten Gebrauch des Produktes bestimmt werden. Soweit Systemfunktionen – wie im Fall der Vollautomatisierung – keine notwendige Rolle des Fahrers bei der Fahrzeugsteuerung mehr vorsehen, könnte sich im Rückschluss ergeben, dass die Annahme eines Anscheinsbeweises im Fall eines Unfallschadens solcher Fahrzeuge naheliegt: Tritt während einer maschinell gesteuerten Fahrt ein (Unfall-)Schaden auf, stellt sich die Frage, ob dies auf einen kausal zugrunde liegenden Produktfehler schließen lässt (soweit die relevante Ursache dieses Schadens nicht in einem Eingreifen des Fahrers in Form einer Übersteuerungshandlung oder einem allein ursächlichen Fehlverhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers liegt – alles im Rahmen der geltenden Darlegungs- und

Beweislast in Zivilverfahren) [10]. Entscheidend wäre im Ergebnis, ob eine fehlerhafte maschinelle Steuerungsentscheidung letztlich als Produktfehler einzuordnen ist und es so in praktisch allen Fällen fehlerhafter Steuerung zur Annahme einer zivilrechtlichen Haftung des Herstellers kommen könnte.

Damit würden – neben dem Fahrzeughalter (vgl. dazu [10]) – letztlich (fast) immer die Hersteller das zivilrechtliche Haftungsrisiko für das mit maschinellem Wirken verbundene Automatisierungsrisiko tragen. Angesichts der erweiterten Einflussmöglichkeiten einer maschinellen Fahrzeugsteuerung (s. hierzu vertiefend Abschn. 25.5.2) würde sich der Anwendungsbereich für steuerungsrelevante Fehler gegenüber einem Fahrer sogar noch ausweiten.

Hier ist allerdings kritisch zu hinterfragen, ob dieser Rückschluss richtig ist: Die Argumentation folgt in weiten Teilen der Annahme, dass die Ursache von Unfällen heute regelmäßig auf fehlerhafte fahrerische Steuerungsentscheidungen zurückzuführen ist. Die (zukünftig gegebenenfalls maschinelle) Fahrzeugsteuerung stellt aber möglicherweise nur eine von mehreren relevanten Unfallursachen dar.

Das heutige Straßenverkehrsrecht scheint noch immer durch ein anderes Grundverständnis geprägt. Deutlich wird dies etwa in der aktuellen Fassung des Straßenverkehrsgesetzes, das von der Existenz „unabwendbarer Ereignisse“ ausgeht (diese sind heute in § 17 Abs. 3 Straßenverkehrsgesetz bei der Zuordnung von Schadensverursachungsanteilen zwischen Kraftfahrzeugen weiterhin von Bedeutung). Dabei ist aber hervorzuheben, dass die heute hierunter zu fassenden Fälle im streng naturwissenschaftlichen Sinn und unter Berücksichtigung des heutigen Standes der Technik voraussichtlich nur teilweise als „unabwendbar“ zu qualifizieren sein werden. Dennoch wird das Verständnis dieses juristischen Begriffs bis heute nur insoweit eingeschränkt, als „äußerste mögliche Sorgfalt“ und das „Verhalten eines ‚Idealfahrers‘“ im Sinne durchschnittlicher Verhaltensanforderungen (und in Abgrenzung zum gedachten „Superfahrer“) hierfür genügen [14]. (Erkennbar liegt hier aber ein anderer Gedanke zugrunde: die Frage nach dem Verschulden eines Unfalls, nicht naturwissenschaftliche Kausalität seines Auftretens.)

Die konsequente Anwendung der Frage nach naturwissenschaftlicher Kausalität könnte bedeuten, dass gegebenenfalls nur eine Teilmenge von Schäden, die während automatisierter Fahrzeugsteuerung auftreten, tatsächlich auf eine fehlerhafte Steuerung (oder einen sonstigen Produktfehler) zurückzuführen sein wird. Dies würde im Ergebnis den oben dargestellten Rückschluss von einem Schaden auf das Vorliegen eines Produktfehlers während automatisierter Steuerung grundlegend infrage stellen. Die offene Frage in diesem Zusammenhang lautet deshalb, inwieweit das heutige „Verkehrssystem Straße“ eine eigenständig relevante Ursache für Unfallschäden (gegenüber gegebenenfalls maschinellen Steuerungsentscheidungen) darstellt.

25.5.2 „Dilemma-Situationen“

Der einprägsame Begriff der „Dilemma-Situation“ beinhaltet im Rahmen der rechtlichen Diskussion zunächst gleich zwei aufeinander aufbauende relevante Aspekte, die charakte-

ristische Merkmale eines maschinellen Wirkens pointiert beschreiben und für den Extremfall die Konsequenzen eines solchen Wandels mit einmaliger Klarheit aufzeigen können: Diese sind erstens die Erweiterung der Einflussmöglichkeit von Fahrzeugsteuerung in zeitkritischen Situationen und zweitens die Frage nach der Umsetzung einer maschinellen Steuerungsentscheidung im grundrechtsrelevanten Bereich.

Zunächst muss grundlegend die Existenz von „Dilemma-Situationen“ im Straßenverkehr infrage gestellt werden. Unklar erscheint insbesondere, ob das zugrunde liegende gedankliche Modell anderweitiger Alternativlosigkeit trägt: Im Straßenverkehr treten im Einzelfall vielfältige, nacheinander geschaltete und stark situationsabhängige Einflussmöglichkeiten bei der Fahrzeugsteuerung auf. Vorangehende alternative Steuerungsentscheidungen im Straßenverkehr bieten somit – möglicherweise, dies wäre näher zu untersuchen – die Möglichkeit, auf das Zustandekommen einer alternativlosen Situation, die zwangsläufig zu einem Schaden führt, Einfluss zu nehmen. Es erscheint nicht ausgeschlossen, durch ein vorausschauendes Steuerungsverhalten alternativlose Situationen von vornherein zu vermeiden. Umgekehrt kann sich aber auch ergeben, dass bestimmte Gefahren des Straßenverkehrs auf seine prägenden Merkmale zurückzuführen und nicht vermeidbar sind (beispielsweise auf die Vielfalt möglicher Interaktion von unterschiedlich geschützten Verkehrsteilnehmern). Dann ist im Ausnahmefall aber auch die Koinzidenz von zwei möglichen Schädigungen denkbar und die Befassung mit „Dilemma-Situationen“ notwendig. In juristischen Kategorien wird hier die – naturwissenschaftlich zu bestimmende – Frage nach relevanten Unfallursachen sowohl hinsichtlich interner (fahrzeugsteuerungsabhängiger) als auch externer (verkehrssystemabhängiger) Faktoren kritisch hinterfragt.

Unabhängig vom Ergebnis dieser theoretischen Betrachtung von Fahrzeugsteuerung im Straßenverkehr ergeben sich in rechtlicher Hinsicht diskussionswürdige Aspekte: So kann anhand von „Dilemma-Situationen“ der grundrechtliche Rahmen für maschinelle Steuerungsentscheidungen autonomer Fahrzeuge aufgezeigt werden. Legt man die Existenz von „Dilemma-Situationen“ zugrunde, ergibt sich darüber hinaus, dass eine Beschränkung der Herstellerverantwortung in diesen Fällen geboten sein könnte, weil Schädigungen sich dann durch Steuerungshandlungen als ebenso unvermeidbar erweisen würden, wie sie es im Fall der Existenz eigenständiger Risiken des „Verkehrssystems Straße“ wären (s. Abschn. 25.5.1).

Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass „Dilemma-Situationen“ auch der Diskussion ethischer Aspekte in verschiedenen Ausprägungen zugrunde gelegt werden, wobei sie auch dort der Pointierung und damit Bearbeitung der übergeordneten ethischen Fragestellung dienen (s. Kap. 4).

25.5.2.1 Erweiterung der Einflussmöglichkeit

Das gedankliche Modell der „Dilemma-Situation“ für autonome Fahrzeuge legt zunächst als Arbeitshypothese zugrunde, dass bestimmte, gesteigert unfallnahe Situationen durch den Einsatz maschineller Fahrzeugsteuerung noch beeinflusst werden könnten: In vielen Fällen könnte es dadurch möglich sein, heute als konkret gefährdet anzusehende Rechtsgüter in buchstäblich letzter Sekunde zu „retten“. Diese Situationen bedürfen nach heutigem Stand der Technik (bei allein menschlicher Fahrzeugsteuerung) immer der Berück-

sichtigung einer Reaktionszeit des Fahrers [14]. Die hierdurch verzögerte Steuerungshandlung kann einzelfallabhängig das Auftreten eines Unfalls oder seine Folgen beeinflussen. Tatsächlich erscheint diese Arbeitshypothese im Zusammenhang mit einem Wandel hin zu maschinellen Steuerungsentscheidungen keineswegs abwegig. Es ließe sich zudem noch annehmen, dass ein weiterer Vorteil dadurch erreicht werden kann, dass alternative Steuerungsmöglichkeiten (wie beispielsweise das Ausweichen anstelle des Bremsens vor einem konkret gefährdeten Fußgänger, was dem Durchschnittsfahrer selten gelingt [15]) von einer maschinellen Steuerung mitberücksichtigt werden können. Eine wesentliche, den „Dilemma-Situationen“ zugrunde liegende Arbeitshypothese lautet deshalb, dass die maschinelle Fahrzeugsteuerung potenziell zur Kontrolle von bislang nicht oder nur verzögert beherrschten Verkehrssituationen führt.

25.5.2.2 Die automatisierte Steuerungsentscheidung

Die hierauf aufbauende weitere Annahme im gedanklichen Modell der „Dilemma-Situation“ berücksichtigt die neuartige maschinelle „Entscheidungsqualität“ einer autonomen Fahrzeugsteuerung. Diese Sichtweise kommt ausdrücklich in der Bezeichnung des „Fahrroboters“ als „Subjekt“ zum Ausdruck, die sich – mit aller in dieser Hinsicht gebotenen Vorsicht – in den grundlegenden Definitionen des vorliegenden Projektes äußert (s. Kap. 2). Um diesen Effekt pointiert hervorzuheben und die ethische Dimension einer maschinellen Steuerungsentscheidung zu argumentieren, erfolgt unter Hinzunahme eines Entscheidungsdilemmas die – in der Natur eines Dilemmas liegende anderweitig ausweglose – Zuspitzung. Eine solche Zuspitzung ist nicht als völlig unrealistisch anzusehen und schon deshalb unbedingt diskussionswürdig, weil es um die gesellschaftliche Akzeptanz einer weitreichenden maschinellen Entscheidungsqualität geht, die hierdurch in den Mittelpunkt gerückt wird. Diese maschinelle Entscheidung kann im Einzelfall – wie in den „Dilemma-Situationen“ konstruiert – das Recht des (konkret gefährdeten) Einzelnen auf Leben und körperliche Unversehrtheit betreffen und liegt insoweit grundsätzlich nicht anders als im Fall der grundrechtsrelevanten Gefahren im heutigen Straßenverkehr (s. hierzu Abschn. 25.3). Der wesentliche Unterschied liegt einzig in der zugrunde liegenden maschinellen Steuerung.

25.5.2.3 Kritische Analyse der „Dilemma-Situation“

Man wird bei einer theoretischen Aufarbeitung möglicher Konsequenzen maschineller Steuerungsentscheidungen der Sache nur gerecht, wenn auch darauf hingewiesen wird, dass die „Dilemma-Situation“ in Gestalt des „Entscheidungsdilemmas“, soweit es überhaupt existiert, die absolute Ausnahme darstellen wird. Für eine sachliche Einordnung ist deshalb einleitend darauf hinzuweisen, dass es sich von vornherein nur um eine sehr seltene Ausnahmesituation handeln kann.

Die dem Dilemma zugrunde liegende Annahme ist, dass keine Alternative zur Schädigung von zwei im Wesentlichen gleichrangigen Rechtsgütern im konkreten Einzelfall denkbar ist, obwohl die maschinelle Fahrzeugsteuerung alle alternativ möglichen Steuerungsentscheidungen berücksichtigt hat. Wenn aber in der konkreten Situation – unter

Beachtung des Steuerungsverhaltens vor Konkretisierung der Gefahr – keine Alternative zur Schädigung verbliebe, können gleichwohl relevante alternative Ursachen als das Steuerungsverhalten in der vorgelagerten Kausalkette in Betracht gezogen werden. So erscheint es etwa plausibel anzunehmen, dass Gefahren möglicherweise nicht allein in der Fahrzeugsteuerung liegen, sondern dem Straßenverkehr als solchem innewohnen können und somit bereits auf die in Abschn. 25.3 beschriebene Komplexität und Vielfalt möglicher Situationen im „Verkehrssystem Straße“ zurückzuführen sind. Dies erscheint insbesondere dann wahrscheinlich, wenn man beispielsweise den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt, deren Höhe voraussichtlich in den meisten Fällen eine notwendige Ursache (im naturwissenschaftlichen Sinn) bei dem Zustandekommen von Verkehrsunfällen darstellen wird. Die „normale“ Fahrgeschwindigkeit ist aber zugleich Bestandteil des heutigen Verständnisses vom „Verkehrssystem Straße“ und bestimmt in weiten Teilen sein Gepräge. Das Bild vom heutigen Straßenverkehr erscheint im Einzelfall durchaus risikobehaftet: So ist durchaus zu hinterfragen, ob in einzelnen Situationen – wie beispielsweise im Fall der Vorbeifahrt an einem Fußgänger – ein Risiko liegt [16], das angepasst werden könnte, um bestehenden Unfallrisiken im Straßenverkehr zu begegnen.

25.5.2.4 „Dilemma-Situationen“ vor dem Hintergrund der Grundrechte

Die rechtliche Bewertung von „Dilemma-Situationen“ sollte konsequent in den übergeordneten rechtlichen Rahmenbedingungen, den Grundrechten, ihren Ausgangspunkt nehmen. Im Bereich des Grundrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit ändert sich durch den Wandel von menschlicher Fahrzeugsteuerung zu maschinellm Wirken nichts von grundlegender Bedeutung: Es kommt insbesondere nicht zu einem „gezielten“ Eingriff in das Leben oder die körperliche Unversehrtheit, der aufgrund der Bedeutung dieser Rechtsgüter als Höchstwert bzw. ihrer fundamentalen Bedeutung praktisch nicht zu rechtfertigen wäre [3]. Zwar ist, wie noch im Zusammenhang mit der Produkthaftung zu diskutieren sein wird, jede Steuerungsentscheidung durch die Programmierung des entsprechenden Systems unter bestimmten Randbedingungen vorgegeben und somit letztlich nicht zufällig, allerdings handelt es sich dabei gerade nicht um die Konkretisierung eines *bestimmten* Handlungsablaufes. Die Programmierung einer autonomen Fahrfunktion gibt vielmehr (nur) vor, welche Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind, sodass hieraus unter mehreren Alternativen diejenige gewählt werden kann, die einen Schaden nach Möglichkeit ganz vermeidet oder den geringsten Schaden verursacht. Gerade in dieser situationsabhängigen Berücksichtigung von Handlungsalternativen liegt der entscheidende Mehrwert einer maschinellen Fahrzeugsteuerung, die in Abschn. 25.5.2.1 als „Erweiterung der Einflussmöglichkeit“ durch maschinelle Steuerung beschrieben wurde. Damit werden aber im Rahmen der Programmierung keine Steuerungsentscheidungen getroffen, sondern (nur) abstrakte Kriterien für die einzelfallbezogene Steuerungsentscheidung vorgegeben. Hieraus wird deutlich, dass es sich letztlich weiterhin um ein abstraktes Risiko handelt, das eine maschinelle Steuerung im Straßenverkehr bedeutet. Sie wäre deshalb vor dem Hintergrund der Grundrechte nicht anders zu behandeln als eine menschliche Fahrzeugsteuerung auch, die die bereits in Abschn. 25.3 dargestellten Risiken birgt. Somit sind die hiermit einherge-

henden unbeabsichtigten Schutzgutverletzungen (vgl. [3]), die Unfälle unter maschineller Fahrzeugsteuerung im Straßenverkehr ebenso herbeiführen, wenn man vom Vorliegen eines Automatisierungsrisikos ausgeht (s. Abschn. 25.5.1), vor dem Hintergrund des Grundrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit nicht anders zu beurteilen als heutige Risiken im Straßenverkehr auch.

Ein Gesichtspunkt sollte aus grundrechtlicher Sicht allerdings besondere Berücksichtigung finden: Soweit sich ergibt, dass die maschinelle Umfelderkennung ausreicht, um nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer (Fußgänger und Radfahrer) als solche zu erkennen, wäre ihr Schutz im Rahmen sich ergebender Handlungsvarianten besonders zu berücksichtigen (s. Argumentation in Abschn. 25.3).

Das mit dem Begriff der „Dilemma-Situation“ beschriebene Entscheidungsdilemma zwischen zwei gleichwertigen Rechtsgütern lässt sich indes vor dem Hintergrund des Grundrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit nicht auflösen: Eine Abwägung mit dem gleichwertigen und im Fall des Lebens als verfassungsrechtlicher „Höchstwert“ geschütztes [3] Grundrecht anderer Grundrechtsträger hat zu unterbleiben und ist unzulässig. Aus rechtlicher Sicht kann deshalb – geht man von der Existenz solcher „Dilemma-Situationen“ in der Realität aus – kein Beitrag im Sinne einer Entscheidung ausgehend vom heutigem Stand der Grundrechtsdogmatik erfolgen, vielmehr würde eine lösungsbedürftige, neuartige Frage aufgeworfen. Von Bedeutung wäre darum, die Frage danach zu klären, ob „Dilemma-Situationen“ tatsächlich in dieser Weise auftreten, also insbesondere, ob die relevante Ursache ihrer Entstehung tatsächlich auf die maschinelle Steuerungsentscheidung zurückzuführen ist und nicht auf ein inhärentes Risiko des „Verkehrssystems Straße“ – beispielsweise aufgrund der dort gefahrenen Geschwindigkeiten in bestimmten Situationen (s. hierzu bereits Abschn. 25.5.2.3). Sollte sich ergeben, dass „Dilemma-Situationen“ existieren und in maschineller Steuerung ihre relevante Ursache finden, würde es sich um eine Frage handeln, die transparent gemacht und – gesellschaftliche Akzeptanz eines Automatisierungsrisikos vorausgesetzt – diskutiert werden müsste. Notwendig wäre dann voraussichtlich die Erstellung eines Kataloges mit anerkannten Entscheidungskriterien für solche Situationen.

Bei alledem wäre zu berücksichtigen, dass die Frage erst durch die Erweiterung der Einflussmöglichkeit aufkommt (s. Abschn. 25.5.2.1), die in den allermeisten Fällen ohne „Dilemma“ zu einer Verbesserung gegenüber der heutigen Ausgangssituation führt: Der naturwissenschaftliche Vergleich des maschinellen Entscheidungsdilemmas mit dem Fahrer heute wird voraussichtlich nämlich ergeben, dass diesem in der ansonsten gleichen Situation – schon aufgrund der zusätzlich zuzugestehenden Schreckzeit (vgl. [14]) – heute kein Schuldvorwurf gemacht wird. Auch kommt es in „Dilemma-Situationen“ unterschiedslos im Fall eines menschlichen Fahrers wie im Fall maschinellen Wirkens letztlich zu einer Schädigung. Der Grund für die Befassung mit der Frage wäre deshalb auf die grundsätzlich erfreuliche Entwicklung zurückzuführen, dass derartige Situationen aufgrund technischer Entwicklung beeinflussbar geworden wären und so regelmäßig die Rettung konkret gefährdeter Rechtsgüter ermöglicht wird. Dem Gewicht dieses Arguments wird man sich voraussichtlich nicht verschließen können.

25.5.3 Möglichkeit zur Übersteuerung durch die Passagiere

Die Frage der Übersteuerungsmöglichkeit von Fahrzeugen resultiert aus der in der Vergangenheit geführten Diskussion zu Fahrerassistenzsystemen, die im Wesentlichen ihren Ausgangspunkt in den nach aktuellem Stand (August 2014) noch gültigen konkreten Formulierungen des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr von 1968 nimmt [17]. Auch wenn dies nicht konkret angesprochen wurde, ist dieser Grundgedanke zugleich verwandt mit der Frage nach den Pflichten des Fahrers bei vollautomatisierter Fahrzeugführung, die in Bezug auf das geltende Verhaltensrecht in Deutschland als widersprüchlich beschrieben worden ist [10]. Der Zusammenhang lässt sich anhand des Begriffes der „Dominanz“ bzw. „Autorität“ beschreiben, der im Rahmen des vorliegenden Projektes den „Use-Cases“ (s. Kap. 2) zugrunde gelegt wurde: Alle vier stellvertretenden Applikationen sehen einen Einfluss des Fahrers bzw. Passagiers auf die Fahrzeugsteuerung vor, der mit zunehmender Reichweite der Autonomie immer weiter zurücktritt, da anderen Instanzen im Rahmen der Funktionsumsetzung Vorrang einzuräumen ist. Bereits die vorliegend betrachtete Stellvertreterapplikation mit der geringsten Autonomie, der „Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpilot“ sieht aber vor, dass der Fahrer „... während der autonomen Fahrt zum einfachen Passagier ...“ wird, sodass er „... einer anderen Tätigkeit nachgehen [kann]“. Hierdurch fehlt es bereits vollständig an einer Grundlage für die jederzeitige Übersteuerungsmöglichkeit, die von vornherein immer faktisch (und nicht nur technisch) für notwendig erachtet worden ist. Die faktische Übersteuerungsmöglichkeit des Fahrers war eine Umschreibung für die bei Fahrerassistenzsystemen seinerzeit noch nicht infrage gestellte „Letztentscheidungsbefugnis des Fahrers“ und damit die untergeordnete Rolle von Fahrerassistenzsystemen gegenüber dem Fahrer bei der Fahrzeugsteuerung, die nur eine abgeleitete Handlungs- und Entscheidungsbefugnis des Systems für möglich hielt (s. Abschn. 25.4.1). Autonome Fahrzeuge stellen diese Situation gänzlich infrage, sodass es nicht sinnvoll erscheint, aus Vorschriften, die einen menschlichen Fahrer bei der Fahrzeugsteuerung zugrunde legen, Ableitungen zu treffen, die Wirkung für die Zukunft entfalten. Dieser grundlegende Wandel zum eigenständigen maschinellen Wirken ist bereits in Abschn. 25.4.2 beschrieben.

Mit Blick auf die Grundrechte lässt sich in diesem Zusammenhang allerdings in aller gebotenen Kürze auf einen Aspekt hinweisen: Die in Art. 2 GG normierten Freiheitsrechte von Passagieren autonomer Fahrzeuge stellen den großen Rahmen dar, der – soweit vorliegend von Relevanz – sich insbesondere auf die Freiheit zur körperlichen Fortbewegung und die freie Entfaltung der Persönlichkeit bezieht (vgl. [3]). Die sich hieraus ergebenden Einschränkungen der Freiheitsausübung scheinen nach aktuellem Stand der Diskussion jedoch nicht grundlegend infrage gestellt, solange den Passagieren autonomer Fahrzeuge stets die Möglichkeit zur Verfügung steht, ein Anhalten des Fahrzeuges an der nächsten sicheren und geeigneten Stelle zu veranlassen.

25.5.4 Fehlerkompensationsfähigkeit beim autonomen Fahren

Eine „grundlegende Annahme“ des vorliegenden Projektes liegt darin, „dass die Use-Cases im Betrachtungszeitraum in einem Mischbetrieb aus Verkehrsmitteln mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden ... von „driver only“ über „assistiert“ bis „vollautomatisiert“ ... eingesetzt werden“ (s. Kap. 2). Insoweit ist zu fordern, dass sich autonome Fahrzeuge in das bestehende Verkehrssystem einfügen.

Im Fall herkömmlicher Fahrzeugführung ist, wie auch im Fall der Verwendung heute verfügbarer Fahrerassistenzsysteme (im weiteren Sinn), denen niemals eine eigenständige Handlungsqualität zukommt (s. Abschn. 25.4.1), die Straßenverkehrsordnung uneingeschränkt anwendbar. Der Fahrer bewegt sich demnach heute im Spannungsfeld zwischen „Vertrauensgrundsatz“ und „defensiver Fahrweise“: Der „Vertrauensgrundsatz“ besagt, dass der sich selbst verkehrsrichtig verhaltende Verkehrsteilnehmer unter normalen Verhältnissen nicht vorsorglich alle möglichen (seltenen) Verkehrsverstöße anderer Verkehrsteilnehmer in Erwägung ziehen muss. Der „Vertrauensgrundsatz“ ist notwendig, um den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten. Zugleich soll der Fahrer heute „defensiv fahren“ (um der Verkehrssicherheit Rechnung zu tragen) und somit mehr als die gebotene Sorgfalt anwenden (was einen teilweisen Verzicht auf Vertrauen in verkehrsrichtiges Verhalten anderer bedeutet), ohne dass dies jedoch den Vertrauensgrundsatz „grundsätzlich“ infrage stellt [14]. Wie diese Anforderungen im Einzelfall, also in Bezug auf den Fahrer in bestimmten Verkehrssituationen verstanden werden, ließe sich in Deutschland aus Urteilen ableiten, wobei die kontinental-europäische Ausrichtung auf systematisiertes Gesetzesrecht allenfalls eine Orientierung in dieser Hinsicht erlaubt, aber kein Präjudiz für den konkreten Einzelfall bedeutet, sodass der Wert einer solchen Zusammenstellung als eher gering einzuschätzen ist.

Von autonomen Fahrzeugen, die sich im „Mischbetrieb“ bewegen, wird im Ergebnis zu fordern sein, dass sie (mindestens) denselben Anforderungen genügen, die auch der Fahrer erfüllen soll – schon um hierdurch keine neuen Gefahren zu verursachen. Bei der präzisen Beschreibung der Anforderungen an eine Fehlerkompensationsfähigkeit ist jedoch festzustellen, dass eine erhebliche Unschärfe verbleibt. Überträgt man deshalb die heutigen rechtlichen Anforderungen im Straßenverkehr in eine Leistungsdefinition einer autonomen Steuerungsfunktion, lässt sich mit ausreichender Sicherheit nur festhalten, dass Fehlerkompensationsfähigkeiten autonomer Fahrzeuge grundsätzlich erforderlich sind: Autonome Fahrzeuge müssten eindeutig erkennbares Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer im Rahmen der Fahrzeugsteuerung berücksichtigen und die maschinelle Steuerung hieran anpassen. Wie dies konkret zu geschehen hat, wird nach heutigem Recht im Einzelfall der Einschätzung des Fahrers überlassen. Allein diese Anforderung technisch umzusetzen, würde eine hohe Leistungsfähigkeit der Umfelderkennung und ausgesprochen komplexe Abwägungsvorgänge voraussetzen; sie werden allerdings – auch im Fall des Fahrers – nicht näher definiert, sondern grundsätzlich im Rahmen der geforderten Fahreignung und Fahrbefähigung von Fahrern vorausgesetzt [18]. Die fehlende Konkretisierung der Anforderungen kann sich deshalb als zu anspruchsvoll für die Umsetzung als maschinelle Steuerung erweisen.

Angesichts resultierender Unsicherheit durch die antagonistische Forderung „defensiven Fahrens“ bleibt somit vorerst nur die – den Verkehrsfluss möglicherweise infrage stellende – Übererfüllung von Fehlerkompensationsfähigkeit im Sinne eines Risikoabschlusses. Dabei bleibt allerdings die Frage offen, ob tatsächlich mit einer erheblichen Einschränkung des Verkehrsflusses zu rechnen ist: Durch die oben dargelegte Erweiterung der Einflussmöglichkeit maschineller Steuerung (s. Abschn. 25.5.2) könnten sich maschinelle Fahrzeugsteuerungen gegenüber dem Fahrer als deutlich leistungsfähiger erweisen. Dieser Vorteil, der derzeit nicht zu bemessen ist, könnte Nachteile für den Verkehrsfluss ausgleichen (wobei der resultierende Umfang ebenso offen bleibt).

In der Frage von Fehlerkompensationsfähigkeiten autonomer maschineller Steuerungssysteme könnte es sich zur Verbesserung der Rechtssicherheit als sinnvoll erweisen, einheitliche, hinsichtlich des Zieles definierte Anforderungen (vergleichbar mit Wirkvorschriften etwa im Bereich von Fahrzeugbremsen) zu formulieren, die den Stand von Wissenschaft und Technik niederlegen und harmonisieren. Ein solcher Leistungskatalog dürfte bei der juristischen Bestimmung von realistischen Leistungsanforderungen an autonome Steuerungssysteme Wirkung entfalten.

25.5.5 Kommunikation im Straßenverkehr

Hinsichtlich der Kommunikation ist für den Straßenverkehr von den heute bestehenden Möglichkeiten auszugehen. Der Gebrauch einiger fahrzeugseitiger Licht- und Schallzeichen – wie die (Licht-)Hupe, der Fahrtrichtungsanzeiger oder die Warnblinkanlage – wird von der StVO, soweit vorhanden, ausdrücklich vorausgesetzt. So sind beispielsweise Warnzeichen (Gebrauch des Warnblinklichts) im Fall von Gefahren bei Schulbussen, wenn Fahrgäste ein- oder aussteigen oder als Warnung im Fall der Annäherung an ein Stauende, dem Liegenbleiben defekter Fahrzeuge und dem Abschleppen vorgesehen (vgl. §§ 15, 15a, 16 Straßenverkehrsordnung). Die Verwendung von Fahrtrichtungsanzeiger und (Licht-)Hupe ist durch § 5 Abs. 4a und 5 Straßenverkehrsordnung im Rahmen eines Überholvorgangs angeordnet bzw. zugelassen. Der Gebrauch des Fahrtrichtungsanzeigers beim Abbiegen (§ 9 Abs. 1 Straßenverkehrsordnung) oder Anfahren (§ 10 Straßenverkehrsordnung) ist, soweit vorhanden, vorgeschrieben. Über diese normativ formalisierte Kommunikation erreicht die Straßenverkehrsordnung eine Erwartungserleichterung bei anderen Verkehrsteilnehmern [19].

Daneben hat sich eine informelle (oder rechtlich nicht abgesicherte) Verwendung von (Licht-)Zeichen eingebürgert, die allerdings nicht durch die Straßenverkehrsordnung vorgesehen ist (so kann in Deutschland die Lichthupe auch als Vorfahrtsverzicht aufzufassen sein). Hierbei ist allerdings anzumerken, dass eine solche Zeichenverwendung bereits nicht mehr dem Schutz des Vertrauensgrundsatzes im Straßenverkehr unterliegt, weil sie nicht als „verkehrsrichtiges“ Verhalten eingeordnet werden kann (und im Übrigen einer erheblichen Gefahr der Fehlinterpretation unterliegt).

Die unmittelbare verbale Kommunikation aus geschlossenen Fahrzeugen im Straßenverkehr wird erschwert, wenn nicht unmöglich gemacht durch die physische Trennung des

Fahrers von der Umwelt und den Lärmpegel der Umgebung. Auch die informelle Verständigung über einfache Gesten ist aufgrund von Spiegelungseffekten bei den heute üblichen getönten und geneigten Fahrzeugscheiben deutlich eingeschränkt. Dennoch lässt sich auch der Straßenverkehrsordnung im Fall „besonderer Verkehrslagen“ eine Anwendungsbestimmung entnehmen, die nicht näher bestimmte informelle Kommunikation vorsieht (als spezialgesetzliche Ausprägung des Vorsichts- und Rücksichtnahmegebotes des § 1 Abs. 1 Straßenverkehrsordnung): So ist bei erforderlichlichem Vorfahrtsverzicht eine Verständigung mit dem Verzichtenden im Rahmen von § 11 Abs. 3 Straßenverkehrsordnung erforderlich, die allerdings voraussetzt, dass diese Verständigung eindeutig erfolgt – hier kann sogar im Ausnahmefall die Lichthupe unterstützend wirken [14].

Angesichts bestehender Herausforderungen bei der Kommunikation (s. auch Kap. 7) kann auch ein vorwegnehmendes Handeln, insbesondere dann, wenn es sich in Bewegung ausdrückt, ein Zeichen für die intendierten Zielhandlungen sein [19], sodass auch dem von außen wahrnehmbaren Verhalten im Straßenverkehr wie dem Anhalten, Abbremsen und Anfahren erhebliche Bedeutung im Rahmen der informellen Kommunikation zukommt. Ausdrücklich vorgesehen wird solches Verhalten beispielsweise auch durch § 8 Abs. 2 StVO, wonach dem im Rahmen einer Vorfahrtsregelung Wartepflichtigen aufgegeben wird, durch sein „... Fahrverhalten ... erkennen [zu] lassen, dass gewartet wird.“

Neben der Nonverbalität und Anonymität wird insbesondere auch die Komplexität der Situation als charakteristische Randbedingung für die Kommunikation im Straßenverkehr beschrieben. Diese Komplexität ist insbesondere durch die Schnelligkeit und Flüchtigkeit der Kommunikation im Straßenverkehr bestimmt [20].

Daraus lassen sich erste wichtige Schlussfolgerungen für das autonome Fahren ableiten: Während die normierte, formelle Kommunikation sich möglicherweise nur als eine Herausforderung für die maschinelle Wahrnehmung und Interpretation darstellt und sich eventuell in der umgekehrten Richtung noch maschinell programmieren lässt, ist hier bereits als Frage aufzuwerfen, inwieweit für andere Fahrer überhaupt Erkennbarkeit maschineller Steuerung gegeben ist oder sich umsetzen ließe. Als Folge stellt sich im „gemischten“ Kommunikationsverhältnis mit Maschinen die Frage, ob andere Fahrer auf den Inhalt erfolgter formeller Kommunikation vertrauen. Das setzt mindestens Kenntnis von diesbezüglichen Fähigkeiten autonomer Fahrzeuge voraus, damit kommunikative Interaktion funktioniert. Gegebenenfalls ergibt sich sogar ein Bedürfnis anderer Verkehrsteilnehmer, die Inhalte maschineller Kommunikation auch im Nachhinein (beispielsweise nach einem Unfall) noch nachvollziehen zu können, um die Bereitschaft aufzubringen, auf maschinelle Kommunikationsinhalte zu vertrauen.

Während die sich ergebenden Herausforderungen im Fall der formellen Kommunikation noch lösbar erscheinen, ist informelle Kommunikation im Mischverkehr von nochmals größeren Herausforderungen geprägt (Mischverkehr liegt der vorliegenden Betrachtung insgesamt zugrunde (s. Kap. 2). Es ergibt sich in diesem Bereich ein Bedürfnis, zu Lösungsansätzen zu kommen, die eine kommunikative Brücke zwischen maschinell gesteuerten Fahrzeugen und den übrigen Verkehrsteilnehmern vermitteln. Letztlich liegt diesem Konflikt die bereits in Abschn. 25.5 beschriebene Ursache zugrunde, dass eine ins Einzelne

gehende Regelung von Kommunikationsverhalten bei menschlichen Fahrern im Straßenverkehr nicht zwingend erforderlich ist und die Umsetzung den Verkehrsteilnehmern im Einzelnen überlassen bleiben kann. Diese informelle Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern mag zwar konfliktträchtig und verbesserungsbedürftig sein [20], dennoch ist anzunehmen, dass Fahrer regelmäßig zur Lösung dieser Herausforderung in allen Situationen in der Lage sind – zumal dies erst die im Straßenverkehr erforderliche situationsindividuelle Anpassung garantiert. Bei Einführung einer maschinellen Fahrzeugsteuerung fehlt den Maschinen diese den Menschen eigene Fähigkeit, eine nicht näher spezifizierte Verständigung herbeizuführen, gegebenenfalls fehlt es bereits an der maschinellen Wahrnehmungsfähigkeit, die Notwendigkeit von Kommunikation überhaupt zu erkennen: Voraussetzung menschlicher Kommunikation ist das Herstellen einer reflexiven Aufmerksamkeit der Kommunikationspartner und Wahrnehmung untereinander [19]. Hier zeigt sich deutlich, dass die „gemischte“ Kommunikation noch grundlegender Ansätze zur Überbrückung dieser kommunikativen Kluft mit Maschinen erfordert. Auch dürfte dies eine Grundvoraussetzung für das Funktionieren eines gemischt fahrerisch und maschinell gesteuerten Straßenverkehrs sein.

Gleichwohl lässt sich für die Realisierung autonomen Fahrens die Bedeutung von Kommunikation danach abstufen, in welchen Situationen vor allem die für eine technische Umsetzung sehr herausfordernd erscheinende informelle Kommunikation von Gewicht ist: Die oben beschriebene Schnelligkeit und Flüchtigkeit der Kommunikation im Straßenverkehr dürfte sich wesentlich nach Umgebungsbedingungen und Fahrgeschwindigkeiten unterscheiden. Einfach strukturierte, extrem flüchtige Umgebungsbedingungen wie auf einer Autobahn, die schon aufgrund der gefahrenen Geschwindigkeiten die weitgehende Verwendung formeller Kommunikation erfordern, könnten eine Umsetzung autonomen Fahrens dort wesentlich erleichtern und ein Anpassungsbedürfnis autonomer Fahrzeuge an den Bedarf nach informeller Kommunikation weniger dringlich erscheinen lassen (als beispielsweise eine innerörtliche Verkehrsumgebung).

Auch ist anzunehmen, dass die Herausforderung, die in der Kommunikation liegt, nur im gemischten Verkehr auftritt, während sie insbesondere zwischen autonomen Maschinen technisch gut lösbar erscheint (über kooperative Systeme). Für den gemischten Verkehr ist zudem zu untersuchen, welche Bedeutung dem vorwegnehmenden Handeln zukommt, das sich in Bewegung ausdrückt, und wie es für eine künftige Kommunikation im Straßenverkehr genutzt werden kann. Insbesondere ist von Bedeutung, welche Situationen möglicherweise hierdurch eindeutig gelöst werden könnten. Hierbei ist aber zugleich die Gefahr zu berücksichtigen, wonach ein maschinelles Fahrsystem – durch eine stark die Fehlerkompensationsfähigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer berücksichtigende Auslegung (s. Abschn. 25.5.4) – möglicherweise die Gefahr birgt, Einbußen für den Verkehrsfluss zu bedeuten, wenn diese durch andere Verkehrsteilnehmer zum eigenen Vorteil ausgenutzt werden.

Abschließend ist hinsichtlich der Kommunikation im Straßenverkehr festzuhalten, dass auch hier ein Katalog der technisch umsetzbaren Kommunikationsstrategien für autonome Fahrzeuge im Sinne eines Leistungskataloges ratsam erscheint, sobald dies technisch absehbar wird. Diese Zusammenstellung von Leistungsmerkmalen autonomer Fahrzeuge im

Hinblick auf die Kommunikation wird insbesondere im gemischten Verkehr langfristig erforderlich sein und könnte die Diskussion um mögliche Kommunikationskonzepte wesentlich voranbringen.

25.5.6 Regelübertretung

Über § 24 Straßenverkehrsgesetz als Blankettnorm in Verbindung mit den Ordnungswidrigkeitstatbeständen aus der Straßenverkehrsordnung (§ 49), Fahrzeugzulassungsverordnung (§ 48), Straßenverkehrszulassungsordnung (§ 69a) und Fahrerlaubnisverordnung (§ 75) werden Verstöße gegen Verbote, Gebote und Anordnungen an Verkehrsteilnehmer und Fahrzeughalter im Straßenverkehr im Wesentlichen geahndet [14]. Als Straftat gelten darüber hinaus Delikte im Zusammenhang mit dem Straßenverkehr aus dem 28. Abschnitt des Strafgesetzbuches (StGB) zu gemeingefährlichen Straftaten (im vorliegenden Zusammenhang sind insbesondere Eingriffe von außen in den Straßenverkehr gemäß § 315b StGB und Gefährdungen im Straßenverkehr gemäß § 315c StGB von einiger Bedeutung). Es liegt auf der Hand, dass ein maschinelles Steuerungsverhalten autonomer Fahrzeuge die Anwendung dieser Vorschriften ausschließt: Es wird bei Ordnungswidrigkeiten und Strafvorschriften stets an ein menschliches Handeln angeknüpft, an dem es vorliegend mangelt.

Die bestehenden Vorschriften, die strafrechtlich und als Ordnungswidrigkeit sanktioniert sind, haben gleichwohl eine Indizwirkung dahingehend, welches Verhalten im Straßenverkehr nicht nur die öffentliche Ordnung, sondern, insoweit hier von besonderem Interesse, gerade auch die öffentliche Sicherheit besonders infrage stellen kann. Die Verkehrsregeln sind dabei gleichwohl „... elastisch (verkehrsgerecht) und ohne Kleinlichkeit zu handhaben und auszulegen ...“, dies gilt auch, soweit es sich um Spezialregelungen handelt, die gegebenenfalls behindern oder gefährden können [14]. Darüber hinaus wird durch den in § 16 des Gesetzes über Ordnungswidrigkeiten geregelten Tatbestand des rechtfertigenden Notstandes ein gesetzlicher Rechtfertigungsgrund normiert, der bei gegenwärtigen, nicht anders abwendbaren Gefahrenlagen für Leben, Leib, Eigentum oder anderen Rechtsgütern erlaubt, auch Verkehrsregeln zuwider zu handeln, um die drohende Gefahr abzuwenden. Allerdings ist ein wesentliches Überwiegen der Gefahren erforderlich und die Angemessenheit der Gefahrenabwehr zu berücksichtigen. Wenngleich die entsprechenden Fälle restriktiv gehandhabt werden müssen, schon um Schutzbehauptungen zu vermeiden, handelt es sich hierbei letztlich um ein normatives Instrument, um eine interessengerechte Abwägung verschiedener grundrechtlich geschützter Rechtsgüter im Einzelfall widerspruchsfrei – und damit verfassungskonform – zu ermöglichen. Die Regelübertretung selbst unterliegt demselben Maßstab, sodass sie ihre äußerste Grenze für den Straßenverkehr letztlich in der „Gefahrschwelle“ für andere Verkehrsteilnehmer findet (vgl. [21] zur Frage der Berücksichtigung von Verkehrssicherheit im Rahmen der Abwägung im Tatbestand des rechtfertigenden Notstands gemäß § 16 Gesetz über Ordnungswidrigkeiten).

Wird vor diesem Hintergrund die Einführung autonomen Fahrens berücksichtigt, ist anzunehmen, dass die Interessenlage sich nicht verändert – jedenfalls für den Mischverkehr von autonomen und fahrgesteuerten Fahrzeugen, der hier zugrunde gelegt wird (s. Kap. 2). Eine Änderung könnte dann eintreten, wenn – aufgrund einer sehr weitgehenden maschinellen Beherrschung des mit der Regelübertretung einhergehenden maschinellen Steuerungsrisikos – die beschriebene Abwägung ergibt, dass eine Risikohöherhöhung durch die Regelübertretung nicht eintritt. Damit wäre dann aber zugleich die Sinnhaftigkeit der betroffenen Regel als solche infrage gestellt: Die „Übertretung“ der Regel würde sich dann im Zusammenhang mit dem Mischverkehr nicht nachteilig auswirken.

Denkbar ist allerdings auch, dass autonomes Fahren dazu führt, dass Verkehrsregeln wesentlich detaillierter erforderlich wären und wesentlich weniger flexibel gehandhabt werden könnten (was wiederum die Frage gesellschaftlicher Akzeptanz aufwerfen würde). Für eine solche Einschränkung der bestehenden Situation wäre wiederum zunächst erforderlich, die technische Steuerungsleistung autonomer Fahrzeuge in einem Leistungskatalog näher zu beschreiben, sobald sie technisch absehbar wird. Dies würde erlauben, die Konsequenzen auch im Fall von Regelübertretungen wesentlich grundlegender zu erörtern, als dies nach gegenwärtigem Stand noch möglich ist.

25.6 Spezielle Rechtsfragen autonomen Fahrens

Hinsichtlich der ordnungsrechtlichen, produkt- und straßenverkehrshaftungsrechtlichen Bewertung vollautomatisierten, fahrerlosen Fahrens kann auf die bereits einleitend gemachten Ausführungen verwiesen werden (s. Abschn. 25.4.2 sowie die Einleitung zu Abschn. 25.5). Zusammenfassend lässt sich hierzu vor allem feststellen, dass insbesondere die ordnungsrechtlichen und straßenverkehrshaftungsrechtlichen Vorschriften (hier vor allem das Straßenverkehrsgesetz, die Straßenverkehrsordnung, Fahrerlaubnisverordnung, Straßenverkehrszulassungsordnung) zum Zeitpunkt ihrer Entstehung nur berücksichtigen konnten, was als Stand der Technik im Straßenverkehr bekannt war und als Regelungsgegenstand einbezogen wurde: Es wird durchgängig im öffentlichen Straßenverkehr von einem Fahrer ausgegangen, der die Fahrzeugsteuerung selbst vornimmt. Dabei ist auch hinsichtlich aller heute marktverfügbaren Systeme zu beobachten, dass sie gerade keine eigenständige Entscheidungsqualität (s. Abschn. 25.4.1) besitzen, sondern voraussetzen, dass der Fahrer mindestens „als Überwacher“ aktiv ist.

25.6.1 Ordnungsrechtliche Bewertung fahrerloser Fahrzeuge

Wird die ordnungsrechtliche Bewertung vollautomatisierten Fahrens [10] deshalb nochmals erweitert auf gänzlich unbemannte Fahrzeuge und Insassen, die nicht in der Lage sind, das Fahrzeug selbst zu führen, ist letztlich festzustellen, dass sich an der bereits bestehen-

den Unvereinbarkeit mit heutigem Ordnungsrecht, das diese technologische Veränderung bislang noch nicht berücksichtigt, zunächst einmal nichts ändert.

Gleichwohl ist darauf hinzuweisen, dass sich fahrerlose oder vollständig autonome Fahrzeuge (s. Use-Cases: „Autonomes Valet-Parken“ und „Vehicle-on-Demand“, Kap. 2) in den sich ergebenden Anforderungen an den rechtlichen Rahmen deutlich von solchen unterscheiden, die einen „Verfügbarkeitsfahrer“ voraussetzen: Mit der fortbestehenden Möglichkeit einer Fahrzeugführung durch den Fahrer sind für bestimmte Fahrabschnitte oder im Fall des Übernahmewunsches durch den Fahrer dieselben Anforderungen grundlegender Art (Fahreignung und Fahrbefähigung, vgl. hierzu [18]) zu erfüllen, die bereits heute an einen Fahrer gestellt werden – im Fall des „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ jedenfalls dann, wenn der Fahrer von der Möglichkeit, als Fahrer selbst zu steuern (also eigenständige Fahrqualität auszuüben), Gebrauch zu machen intendiert. Insoweit bedarf es keines grundlegend anderen, sondern eines um notwendige Vorschriften für autonome Fahrzeuge und damit eigenständige maschinelle Entscheidungsqualität ergänzten Rechtsrahmens. Mit Blick auf diese eigenständige maschinelle Entscheidungsqualität kommt man deshalb für alle Use-Cases in rechtlicher Hinsicht zu demselben Ergebnis. Der Wandel liegt vor allem in der Ermöglichung des eigenständigen maschinellen Wirkens und seiner Ausgestaltung. Die Ausgestaltung maschineller Fahrzeugsteuerung in ordnungsrechtlicher Hinsicht ist heute unregelt, obwohl eine Regelung – zumindest in sinngemäßer Anwendung mindestens der verhaltensrechtlichen Vorschriften der Straßenverkehrsordnung als technische Wirkvorschriften – angezeigt erscheint.

Sofern sich ein Regelungsbedürfnis autonomen Fahrens daher nicht bereits aus dem neuartigen maschinellen Automatisierungsrisiko selbst ergibt (s. Abschn. 25.5.1), erscheint zumindest im Hinblick auf den Einsatz entsprechender Funktionen im gemischten Verkehr hinsichtlich der Fehlerkompensationsfähigkeiten (s. Abschn. 25.5.4) und des Kommunikationsverhaltens (s. Abschn. 25.5.5) autonomer Fahrzeuge eine ordnungsrechtliche Regelung aber angezeigt. Bei der ordnungsrechtlichen Regelung solchen Interaktionsverhaltens wird zudem sehr genau zu berücksichtigen sein, wie weit die Rolle des Fahrers im Einzelfall überhaupt reicht: Berücksichtigt man die sich ergebenden technischen Möglichkeiten für eine im Einzelfall auch allein maschinell geprägte Mobilität (wie in den Use-Cases „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“ oder „Vehicle-on-Demand“ beschrieben), erscheinen die bislang grundlegenden Anforderungen an Fahreignung und Fahrkompetenz bereits verzichtbar. Durch die vielfältigen Möglichkeiten könnte es deshalb letztlich zu einer bislang nicht gekannten Vielfalt ordnungsrechtlicher Vorgaben für die Teilnahme am Straßenverkehr mit (autonomen) Fahrzeugen kommen, die sich im Wesentlichen danach unterscheiden könnte, wie weit maschinelle Steuerungsqualität reicht und in welchem Umfang sie genutzt werden soll.

25.6.2 Bewertung autonomen Fahrens nach dem Haftungsrecht im Straßenverkehr

Hinsichtlich der mit dem autonomen Fahren einhergehenden Veränderung zu einem eigenständigen maschinellen Wirken bei der Fahrzeugsteuerung ist auch für die Bewertung des Haftungsrechtes im Straßenverkehr grundlegend festzustellen, dass die bestehenden Vorschriften diese Veränderung nicht berücksichtigen konnten.

25.6.2.1 Halterhaftung

Gleichwohl besteht in diesem Bereich eine grundlegende Haftungsvorschrift für Kraftfahrzeuge (§ 7 Straßenverkehrsgesetz), wonach der Halter des Fahrzeuges verschuldensunabhängig für den Fahrzeugbetrieb zum Ersatz aller kausal hierauf zurückzuführenden Schäden, die nicht Vermögensschäden sind, verpflichtet wird (einziger verbleibender Haftungsausschlussgrund ist die höhere Gewalt, § 7 Abs. 2 Straßenverkehrsgesetz). Diese Beschränkung auf den Fahrzeugbetrieb als haftungsauslösendes gesetzliches Tatbestandsmerkmal unterscheidet deshalb bereits heute nicht danach, ob es sich um einen Schaden handelt, der durch fahrerisches Steuerungsverhalten oder durch technisches Versagen verursacht wird. Da auch maschinelle Steuerungsentscheidungen, die kausal einen Schaden verursachen, sich widerspruchsfrei als technisches Versagen einordnen lassen, treten in dieser Hinsicht keine grundlegenden Widersprüche auf.

Fahrzeughalter ist, wer das Fahrzeug für eigene Rechnung gebraucht, also insbesondere die Nutzungen zieht und die Kosten bestreitet und somit auch berechtigt ist, über die Benutzung des Fahrzeuges als Gefahrenquelle zu entscheiden [14]. Geht man davon aus, dass auch fahrerlosen Fahrzeugen ein Halter zuzuordnen ist, was widerspruchsfrei nach geltendem Recht möglich wäre, würde in dieser Hinsicht auch bei solchen Fahrzeugen keine Unvereinbarkeit mit geltendem Recht auftreten. Autonomes Fahren würde dennoch den Gegenstand der Halterverantwortung verändern – allerdings ist die Halterverantwortung für autonomes Fahren nach dem heutigen Wortlaut der Vorschrift bereits mit umfasst: Die bislang durch den Fahrer erfolgende Fahrzeugsteuerung wird durch eine maschinelle Fahrzeugsteuerung ersetzt (soweit der Anwendungsbereich der jeweiligen autonomen Steuerung reicht). Für die Halterverantwortung ergeben sich daher nicht neue Pflichten, sondern eine völlig andere, neue Steuerungsqualität, die zivilrechtliche Haftung auslöst.

25.6.2.2 Fahrerhaftung und Unfalldatenaufzeichnung

Andere für die zivilrechtliche Haftung relevante Vorschriften des Straßenverkehrsgesetzes legen hingegen eindeutig die Steuerung eines Fahrers zugrunde, so beispielsweise § 18 Abs. 1 Straßenverkehrsgesetz, wonach in den Fällen der Halterhaftung zugleich eine Haftung des Führers des Kraftfahrzeuges vermutet wird (vgl. Satz 2). Damit liegt aber auch § 18 Straßenverkehrsgesetz letztlich nur wieder die bislang uneingeschränkt korrekte Annahme zugrunde, wonach stets ein Fahrer für das Steuerungsverhalten des Fahrzeuges zuständig ist. Letztlich unterscheidet sich deshalb die haftungsrechtliche Bewertung von fahrerlosen Fahrzeugen inhaltlich nicht von vollautomatisierten [10] Fahrzeugen. Entspre-

chend verhält es sich auch mit den bislang für deliktisches Verhalten von Fahrern anwendbaren Vorschriften des Bürgerlichen Gesetzbuches (beispielsweise § 823 Abs. 1 BGB oder § 823 Abs. 2 BGB in Verbindung mit verletzten Vorschriften der StVO), die gleichermaßen bei eigenständiger maschineller Fahrzeugsteuerung diese nicht mehr erfassen können (da sie an ein menschliches Handeln anknüpfen, das bei autonomen Fahrzeugen nicht gegeben ist).

Bei den vorliegend betrachteten autonomen Fahrzeugen, die zum Teil nicht einmal die Anwesenheit oder gelegentliche Steuerung durch einen Fahrer bedingen, ist infrage zu stellen, inwieweit für den Regelfall noch von der Fähigkeit der Fahrzeuginsassen auszugehen ist, einen Unfallhergang beschreiben zu können. Damit wird deutlich, dass bei der Frage des inneren Ausgleichs von Unfallschäden, die unter Beteiligung von zwei oder mehreren autonomen Fahrzeugen auftreten, die Schadensaufteilung nach geltendem Recht und damit § 17 Straßenverkehrsgesetz vor dem Problem steht, dass das vorwiegend zur Anwendung kommende „Maß der Verursachung“ [14] nicht mehr – wie heute aber üblich – mindestens auf eine Vernehmung der Fahrer (zumeist zugleich zivilrechtliche Prozesspartei, gegebenenfalls aber auch Zeuge) gestützt werden kann: Dem liegt vor allem die Rollenveränderung zugrunde, wonach der Fahrer „zum einfachen Passagier“ (s. Kap. 2) wird und deshalb zum Unfallhergang eher ausnahmsweise und nur aufgrund zufälliger Beobachtung Angaben machen können. Insoweit tritt eine Veränderung ein, die bereits für das Haftungsrecht im Straßenverkehr erforderlich erscheinen lässt, dass technische Vorkehrungen (wie eine Unfalldatenaufzeichnung während automatisierter Steuerung) als Grundlage für eine entsprechende Schadensaufteilung getroffen werden, sofern man haftungsrechtlich an diesem Aufteilungsprinzip nach Verursachungsanteilen auch für das autonome Fahren festhalten möchte (was durchaus möglich erscheint).

25.6.3 Bewertung nach dem Produkthaftungsrecht

Der Bereich der Produkthaftung für die automatisierte Steuerung autonomer Fahrzeuge wurde bereits in Abschn. 25.5.1 behandelt. Demnach kommt der Frage nach der im Einzelfall relevanten Ursache für einen Unfallschaden im Sinne naturwissenschaftlicher Kausalität entscheidende Bedeutung zu.

25.6.3.1 Produkthaftungsrechtliche Bedeutung eines Unfalldatenschreibers für das autonome Fahren

Darüber hinaus ergibt sich aber für die Fälle autonomen Fahrens, die einen „Verfügbarkeitsfahrer“ voraussetzen (s. Use-Cases „Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – AutobahnpiLOT“ und „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“, Kap. 2), noch ein weiterer Aspekt, der wiederum im Zusammenhang mit der Frage eines Unfalldatenschreibers steht: Sowohl im Hinblick auf das Produkthaftungsrecht (als auch ordnungsrechtlich hinsichtlich bußgeldbewehrter Verstöße gegen das Ordnungsrecht) liegt es nahe anzunehmen, dass als Schutzbehauptung durch einen aktiven Verfügbarkeitsfahrer vorgebracht werden könnte,

nicht selbst, sondern mithilfe des autonomen Steuerungssystems das Fahrzeug geführt zu haben. Will man entsprechende Schutzbehauptungen ausschließen, wird man sowohl zur produkthaftungsrechtlichen Absicherung des Herstellerinteresses als auch zur Erbringung des Nachweises im Rahmen des Ordnungswidrigkeitenrechtes kaum umhin kommen, eine Aufzeichnung von Daten bei der Fahrzeugsteuerung – mindestens während autonomer Steuerungsdauer – in Erwägung zu ziehen. Die Möglichkeit hierzu erscheint unter dem Aspekt des Datenschutzes zunächst nicht ausgeschlossen, sofern die Daten im Fahrzeug verbleiben, das Transparenzgebot gewahrt wird und die Datenverarbeitung nur im erforderlichen Umfang erfolgt, Daten mithin beispielsweise nur im Fall eines Unfallschadens dauerhaft gespeichert würden. Darüber hinaus ist eine Einschränkung der Datenaufzeichnung auf die Zeitdauer maschineller Steuerung in Erwägung zu ziehen, was dem Gebot der Datensparsamkeit (§ 3a Bundesdatenschutzgesetz), das sich im Übrigen gleichermaßen aus dem Verhältnismäßigkeitsprinzip jeder Datenverarbeitung ergeben wird, genügen sollte. Hierdurch würde auch die Aufzeichnung von Verhaltensdaten zur Fahrzeugsteuerung durch den Fahrer weitgehend vermieden. Besonderer Aufmerksamkeit bedürfte allerdings auch der Übergang zwischen den von Fahrern gesteuerten und maschinell gesteuerten Fahrschnitten. In diesem Übergangsbereich könnte eine Datenaufzeichnung von besonderer Bedeutung sein, allerdings würde es sich zugleich eindeutig um Daten handeln, die auf den Fahrer bezogen sind. Insoweit wäre in einem ersten Schritt zu klären, welcher Aufzeichnungsumfang einer vom Fahrer gesteuerten Fahrt zur Absicherung gegen nachträgliche Schutzbehauptungen erforderlich wäre.

25.6.3.2 Der Stand von Wissenschaft und Technik beim autonomen Fahren

Produkthaftungsrechtlich erscheint für den Laien der Haftungsausschluss für Fehler im Zusammenhang mit maschineller Fahrzeugsteuerung von Interesse, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zum Zeitpunkt des In-Verkehr-Bringens nicht erkannt werden können. In diesem Zusammenhang des Produkthaftungsrechtes ist zunächst erneut auf die insoweit bereits in Abschn. 25.5.1 diskutierte Frage hinzuweisen, wonach im Bereich des Straßenverkehrs möglich erscheint, dass Risiken, die sich im Unfallgeschehen verwirklichen, auch auf das heutige Verkehrssystem als relevante Ursache zurückzuführen sein könnten (und nicht in allen Fällen auf das Steuerungsverhalten – von Fahrern oder Maschinen gleichermaßen). Diese Frage ist grundlegend und bedarf vorrangig der Beantwortung, um nicht auf das Vorliegen von (vermeintlichen) Produktfehlern als relevanter Ursache rückzuschließen.

Soweit der Haftungsausschlussgrund nach dem Stand von Wissenschaft und Technik aber betroffen ist, muss berücksichtigt werden, dass dieser Ausschlussstatbestand in der Praxis von ausgesprochen geringer Bedeutung ist: Ob eine Gefahr nach dem Stand von Wissenschaft und Technik nämlich tatsächlich erkennbar war, ist in zwei Schritten zu prüfen: Zunächst ist zu bestimmen, ob der Fehler für irgendeinen Wissenschaftler oder Techniker auf der Welt erkennbar war. Wenn er es war, ist die Berufung auf den Ausschlussstatbestand noch nicht ausgeschlossen, weil es dann noch auf die objektive Zugänglichkeit dieser Erkennbarkeit für den Hersteller ankommt. Ausdrücklich zu berücksichtigen sind

dabei aber auch abweichende Meinungen einzelner Wissenschaftler, sofern diese Arbeiten den Mindestanforderungen wissenschaftlichen Arbeitens genügen [22].

Insoweit ist auch für autonome Fahrzeuge entscheidend, ob die Erkennbarkeit eines Fehlers zum Zeitpunkt des In-Verkehr-Bringens tatsächlich ausgeschlossen werden konnte (zudem müsste dies im Nachhinein, wenn es zu einem Unfallschaden gekommen ist, im zivilrechtlichen Verfahren aufgrund der dort geltenden Darlegungs- und Beweislast noch nachgewiesen werden). Nur in diesem seltenen Fall würde der Hersteller über diesen Haftungsausschlussgrund des Produkthaftungsgesetzes (und mangels Verschulden auch nach § 823 Abs. 1 BGB) an Rechtssicherheit gewinnen. In der Praxis wird dieser Fall nahezu bedeutungslos sein.

Ein Bewusstsein dafür, dass Produktfehler auch nach dem Stand von Wissenschaft und Technik bei Beachtung aller notwendigen Sorgfalt möglicherweise nicht gänzlich auszuschließen sind, mithin eine „Restfehlertoleranz“ – wie sie die Norm ISO 26262 zugrunde legt – besteht, ist darum als eine technische Beschreibung des Entwicklungsprozesses aufzufassen, die im Produkthaftungsrecht keine Entsprechung findet.

25.6.4 Mögliche Abweichungen der rechtlichen Bewertung im internationalen Kontext

Zunächst ist darauf hinzuweisen, dass das vorliegende Kapitel von vornherein nur die Situation nach deutschem Recht in Betracht zieht und Aussagen trifft, die sich an dem in Deutschland heute geltenden Recht orientieren. Von einer Anwendung auf andere Länder kann nur eingeschränkt ausgegangen werden. Eine Übertragbarkeit der Schlussfolgerungen wird abgesehen von Zufälligkeiten insbesondere dann möglich sein, wenn es zu einer Vereinheitlichung des Rechts aufgrund internationaler Verträge (also im Rahmen des Völkerrechts) oder durch Verordnungen und Richtlinien im Rahmen der Rechtssetzung der EU gekommen ist.

Demzufolge ist darauf zu verweisen, dass hinsichtlich der dargestellten grundrechtlichen Situation ein weitgehend übereinstimmender Grundrechtsstandard – soweit vorliegend im Zusammenhang mit den deutschen Grundrechten auf Leben und körperliche Unversehrtheit von Bedeutung – beispielsweise auch durch die Charta der Grundrechte der Europäischen Union anerkannt wird. Sie weist Bezüge zur Europäischen Menschenrechtskonvention auf und mit Ausnahme des Vereinigten Königreiches und Polens wurde durch Verweis im Lissabonner Vertrag die Europäische Grundrechtscharta für die Länder der Europäischen Union für bindend erklärt. Die Rechte auf Leben und körperliche Unversehrtheit werden darin anerkannt – im Einzelnen gemäß Art. 2 Abs. 1 und Art. 3 Abs. 1 Charta der Grundrechte der Europäischen Union (vgl. [23]). Diese Betrachtung ließe sich darüber hinaus beliebig auf die Verfassungen anderer Staaten ausweiten; festzuhalten ist insoweit jedoch, dass die Grundrechtsdogmatik sich in vielen Einzelbereichen deutlich unterscheiden kann. Eine solche Untersuchung obliegt deshalb den Spezialisten der jeweiligen Rechtsmaterie.

Das gilt gleichermaßen für das Ordnungsrecht im Straßenverkehr wie auch für das zur Anwendung kommende Haftungsrecht, das für autonomes Fahren von Bedeutung ist. Hierbei ist aber, wie in Abschn. 25.6.1 und Abschn. 25.6.2 beschrieben, bereits die Rechtslage nach deutschem Recht in sehr weiten Teilen nur sehr eingeschränkt auf das autonome Fahren übertragbar. Es erscheint durchaus möglich, dass eine vergleichbare Situation auch nach anderen Rechtsordnungen besteht. Hierfür spricht auch, dass internationale Straßenverkehrsübereinkommen wie das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1968 oder das Genfer Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1949 ein mit der deutschen Straßenverkehrsordnung durchaus vergleichbares Fahrerbild sowie ständige Fahrzeugsteuerung durch einen Fahrer zugrunde legen.

Im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit ist insoweit auf das Produkthaftungsrecht hinzuweisen, das durch die Richtlinie 85/374/EWG des Rates vom 25. Juli 1985 innerhalb der Europäischen Union bereits vereinheitlicht worden ist. Auch hier bestehen zwar neben rechtsdogmatisch zu machenden Einschränkungen noch Unsicherheiten darin, dass die Richtlinie bei ihrer Umsetzung nur hinsichtlich des Zieles verbindlich ist (ein Grundsatz, der schon nach der vormaligen Rechtslage bestand und sich heute in Art. 288 Abs. 3 des Vertrages über die Arbeitsweise der Europäischen Union findet). Dennoch liegt immerhin eine inhaltlich vergleichbare Rechtsmaterie für die innerstaatliche Rechtsanwendung vor, die nicht an ein Verschulden anknüpft (sogenannte Gefährdungshaftung).

Zusammenfassend ist deshalb festzuhalten, dass in diesen Bereichen noch erhebliche Unterschiede bestehen, die sich auf die Entwicklung autonomen Fahrens auswirken könnten. Das ist aber aufgrund der nationalen Prägung des Rechts nicht im Einzelnen absehbar und – soweit gegenwärtig ersichtlich – weiterhin untersuchungsbedürftig.

25.6.5 Sonderfrage: Aufsichtspflicht über Insassen autonomer Fahrzeuge

Der Nutzen autonomen Fahrens liegt u. a. darin, dass Aufmerksamkeitsressourcen des Menschen nicht mehr für die Ausführung der Fahraufgabe benötigt werden. Dies kann potenziell dazu führen, die Anwesenheit des „Fahrers“ und damit der aufsichtspflichtigen Person im Fahrzeug insgesamt infrage zu stellen. So würde ein erheblicher Mehrnutzen autonomen Fahrens sich daraus ergeben, dass auch Mobilitätswünsche von Kindern – ohne eines Fahrers zu bedürfen – erfüllt werden könnten. Es ist deshalb keineswegs auszuschließen, dass hieraus Gefahren resultieren, wenn es sich – wie voraussichtlich häufig – beim Fahrer um die aufsichtspflichtige Person handelt, die dann nicht mehr anwesend ist.

Allerdings erscheint von den vorliegenden Stellvertreterapplikationen nur der Fall des „Vehicle-on-Demand“ überhaupt geeignet, eine solche Transportaufgabe ohne die Begleitung Aufsichtspflichtiger überhaupt durchzuführen: Selbst die Stellvertreterapplikation des „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ setzt die Anwesenheit eines Fahrers voraus, um nicht freigegebene Verkehrsbereiche oder vom autonomen Fahren ausgenommene Streckenabschnitte befahren zu können (s. Kap. 2). Da die Stellvertreterapplikation des

„Vehicle-on-Demand“ schon keinen Fahrerplatz aufweist (sondern einen völlig frei gestalteten Innenraum), erscheinen Gefahren und Auswirkungen aus der Nutzung durch aufsichtsbedürftige Personen sich zunächst auf den Fahrzeuginnenraum zu beschränken und sich nicht auf den Straßenverkehr auszuwirken. Dann würde sich die Frage der Abwesenheit aufsichtspflichtiger Personen allerdings nicht mit Relevanz im Bereich des Straßenverkehrs stellen. Es erscheint allerdings ebenso denkbar, dass entsprechende autonome Fahrzeuge noch einen Fahrerplatz aufweisen. Dann wäre aber auch potenziell ein erheblicher negativer Einfluss auf die Fahrzeugsteuerung möglich, indem eine Übersteuerung der autonomen Fahrfunktion über die Bedienelemente erfolgt.

Es bleibt festzustellen, dass die rechtliche Frage der Aufsichtspflicht nicht von der Einführung autonomen Fahrens abhängig ist. Vielmehr können schon heute eigenständige Schadensersatzpflichten durch eine Aufsichtspflichtverletzung herbeigeführt werden (vgl. § 832 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB)). So besteht eine gesetzliche Aufsichtspflicht der Eltern im Rahmen elterlicher Sorge, §§ 1626 ff. BGB. Damit wäre abhängig von Alter, Eigenart, Charakter, Kenntnissen und Fähigkeiten beispielsweise eines Kindes zu bestimmen, welche Intensität der Aufsicht angesichts einer Vorausssehbarkeit schädigenden Verhaltens im Einzelfall geboten ist [24]. Wird eine sich ergebende Pflicht verletzt und kommt es hierdurch zu einem Schaden, kann sich ein eigenständiger Schadensersatzanspruch (neben einem gegebenenfalls gegen das Kind selbst bestehenden Anspruch) auch gegenüber den Eltern des Kindes ergeben. Insoweit könnte aus den entsprechenden Möglichkeiten autonomer Fahrzeuge resultieren, dass der korrekten Erfüllung von Aufsichtspflichten in diesem Zusammenhang eine neue, bislang unbekannte Bedeutung zukommt. Ein rechtlicher Änderungsbedarf ist aber nicht ersichtlich.

25.7 Fazit

Aus der mit dem vorliegendem Kapitel vorgenommenen Betrachtung autonomen Fahrens aus einer rechtlichen Perspektive tritt – neben den bereits in den jeweiligen Unterabschnitten aufgeworfenen Fragen – vor allem ein grundlegender Aspekt in Erscheinung, der im Zusammenhang mit dem Wandel von einer menschlichen zu einer maschinellen Fahrzeugsteuerung möglicherweise deutlicher als bisher erkennbar wird: Auch wenn heute davon ausgegangen wird, dass grundsätzlich jeder Unfall von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr auf ein Versagen bei der Steuerung zurückzuführen ist, muss im Sinne einer naturwissenschaftlichen Aufarbeitung danach gefragt werden, inwieweit das heutige Verkehrssystem angesichts der dort herrschenden Rahmenbedingungen nicht eine eigenständige, relevante Ursache für einen Teil des heutigen Unfallgeschehens darstellt. Die Beantwortung dieser Frage ist dabei nicht Selbstzweck, sondern kann helfen zu erkennen, ob und gegebenenfalls welche Veränderungen bei der Fahrzeugsteuerung unter bestimmten Umgebungsbedingungen geeignet sind, Unfälle zu vermeiden. Für die Gestaltung eines autonomen Fahrzeuges als ein sicheres Produkt ist dies seitens eines Herstellers zudem entscheidend hinsichtlich der Ausgestaltung autonomer maschineller Steuerungsfunktionen.

Weiterhin scheint für die weitere Bearbeitung – wie auch für die Rechtssicherheit sowohl der (Fahrzeug-)Betriebsverantwortlichen als auch der Hersteller autonomer Fahrzeuge – die Beschreibung maschineller Steuerungsqualität im Sinne einer Leistungsdefinition ein wichtiger Meilenstein zu sein. Hierauf könnte eine Bewertung aufbauen, die ermittelt, genau in welchen Bereichen beispielsweise bezüglich der Kommunikationsfähigkeiten autonomer Fahrzeuge oder Fehlerkompensationsfähigkeiten noch Entwicklungsbedarf besteht. Umgekehrt wird eine Betrachtung ermöglicht, wie der entsprechende rechtliche Rahmen ausgestaltet sein muss, um zu einem funktionierenden „Verkehrssystem Straße“ unter Beteiligung autonomer Fahrzeuge zu kommen.

Literatur

1. Homann, K.: Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand. In Maurer, M.; Stiller, C. (Hrsg.), Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Berlin (2005)
2. Projekt: Realisierung einer automatisierten U-Bahn in Nürnberg (RUBIN) – Automatisierung der U-Bahn-Linien U2 und U3 in Nürnberg, ausgeführt durch die Siemens Mobility (ehemals: Siemens TS). Konzeptionelle Darstellung inzwischen nur noch unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/RUBIN> sowie Hinweis auf das Pilotprojekt der Siemens Mobility unter: http://www.siemens.de/staedte/referenzprojekte/seiten/rubin_nuernberg.aspx
3. Murswiek, Dietrich: Grundgesetz Kommentar (zu Art. 2 GG). In Sachs, M. (Hrsg.), 6. Auflage, München (2011)
4. Heldmann, Horst: 15 Jahre Strafbewehrung der Gurtanlegepflicht in Zeitschrift für Verkehrssicherheit (ZVS) 45 (1999), S. 146–159
5. Statistisches Bundesamt, Verkehrsunfälle 2013 – Fachserie 8, Reihe 7. Wiesbaden (2014)
6. Herber, Franz-Rudolf: Die öffentliche Straße als öffentliche Sache – öffentliche Sachherrschaft und private Sachherrschaft. In Kodat, K. (Hrsg.): Straßenverkehrsrecht. 7. Auflage, München (2010)
7. Stahlhut, Ulrich: Der schlichte Gemeingebrauch. In Kodat, K. (Hrsg.): Straßenverkehrsrecht. 7. Auflage, München (2010)
8. Daimler AG: Mercedes Benz, Betriebsanleitung Interaktiv S-Klasse. Menüpunkte: „Vertiefen“/ „Fahrssysteme“/ „DISTRONIC PLUS“. Online abgerufen: http://www4.mercedes-benz.com/manual-cars/ba/cars/221/de/manual_base.shtml (am 04.08.2014)
9. Maurer, Markus: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In Winner, H.; Hakuli, S. und Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, Wiesbaden (2012)
10. Gasser, Tom M.; Arzt, Clemens; Ayoubi, Mihir; Bartels, Arne; Bürkle, Lutz; Eier, Jana; Flemisch, Frank; Häcker, Dirk; Hesse, Tobias; Huber, Werner; Lotz, Christine; Maurer, Markus; Ruth-Schumacher, Simone; Schwarz, Jürgen; Vogt, Wolfgang: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der BAST-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ Dokumentteil 1. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, 2012 (Heft F 83)
11. Bundesverfassungsgerichtsentscheidung Band 47, Seiten 46–85 (Sexualkundeunterricht), Ausführungen zum sogenannten „Wesentlichkeitsgrundsatz“: Seite 79. Beschluss des 1. Senates v. 21. Dez. 1977
12. Bundesverfassungsgerichtsentscheidung Band 83, Seiten 130–155 (Josefine Mutzenbacher), Ausführungen zum sogenannten „Wesentlichkeitsgrundsatz“: Seite 142. Beschluss des 1. Senates v. 27. Nov. 1990

13. Bundesverfassungsgerichtsentscheidung Band 49, Seiten 89–147 (Kalkar I), Ausführungen zum „Parlamentsvorbehalt“: Seiten 124ff. Beschluss des 2. Senates v. 08. August 1978
14. König, Peter: Kommentierung zur Straßenverkehrsordnung und Straßenverkehrsgesetz. In Hentschel, P.; König, P.; Dauer, P.: Straßenverkehrsrecht (Kommentar). 42. Auflage, München (2013)
15. Spiegel, Richard: Die neuen Erkenntnisse über die Reaktionszeit des Kraftfahrers und die Rechtsprechung. Veröffentlichung der auf dem 20. Verkehrsgerichtstag am 28. und 29. Januar 1982 gehaltenen Referate, Arbeitskreis I. Hamburg (1982)
16. Seiniger, Patrick; Bartels Oliver; Pastor, Claus; Wisch, Marcus: An Open Simulation Approach to Identify Chances and Limitations for Vulnerable Road User (VRU) Active Safety. Traffic Injury and Prevention, Heft 14, S. 2–12 (2013)
17. Albrecht, Frank: Fahrerassistenzsysteme zur Geschwindigkeitsbeeinflussung. Deutsches Auto-recht (DAR), Heft 4, S. 186–198 (2005)
18. Bahr, Michael; Sturzbecher, Dietmar: Bewertungsgrundlagen zur Beurteilung der Fahrbe-fähigung bei der praktischen Fahrerlaubnisprüfung. Beitrag im Rahmen des 6. Darmstädter Kolloquiums: Maßstäbe des sicheren Fahrens (2013)
19. Merten, Klaus: Informelle Zeichengebung im Straßenverkehr. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen Nr. 53. Köln (1981)
20. Merten, Klaus: Kommunikationsprozesse im Straßenverkehr. Unfall- und Sicherheitsforschung im Straßenverkehr, Heft 14, S. 115–126. Bonn (1977)
21. Beschluss des Oberlandesgerichtes Hamm v. 30.10.1995 (Aktenzeichen: 2 Ss OWi 1097/95) in Verkehrsrechtssammlung Band 91, Nr. 50, Seite 125 ff. (1996)
22. Wagner, Gerhard: Bearbeiter der Kommentierung des Produkthaftungsgesetzes und § 823 Abs. 1 BGB in Münchener Kommentar zum BGB, Band 5, Schuldrecht Besonderer Teil III, §§ 705–853 BGB, Partnerschaftsgesellschaftsgesetz, Produkthaftungsgesetz. 5. Auflage, München (2009)
23. Charta der Grundrechte der Europäischen Union. Amtsblatt der Europäischen Union C 83/ 389 vom 30.03.2010 (2010/C 83/02) (2010). Im Internet verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2010:083:0389:0403:DE:PDF> (Abruf am 22.08.2014)
24. Sprau, Hartwig: Kommentierung zu §§ 631–853 des Bürgerlichen Gesetzbuches. In Palandt, Bürgerliches Gesetzbuch, Kommentar, 73. Auflage, München (2014)

Stephen S. Wu

Content

26.1 Introduction 576

26.2 Why do product liability suits occur? 577

26.3 More recent high-profile product liability litigation 579

 26.3.1 “Sudden acceleration” litigation 580

 26.3.2 General Motors ignition switch issues and recall 581

26.4 Claims and defenses in product liability cases 582

 26.4.1 Strict product liability claims 582

 26.4.2 Negligence claims 583

 26.4.3 Breach of warranty claims 584

 26.4.4 Claims under consumer protection laws 585

 26.4.5 Types of defects at issue in autonomous vehicle litigation 585

 26.4.6 Defenses in product liability cases 587

26.5 Managing the risk of autonomous vehicle product liability 588

26.6 Conclusions 590

 References 590

S.S. Wu (✉)
USA
ssw@svlg.com

26.1 Introduction

Autonomous vehicles (AVs) hold the promise of saving tens of thousands of lives each year in the U.S., and many more worldwide, reducing traffic, saving energy, and providing mobility to those who cannot drive conventional cars. Nonetheless, AVs will inevitably have some accidents. On balance, AVs are likely to prevent many more accidents than they cause, but there will be at least some accidents involving AVs that would not have occurred with conventional vehicles.

Because of accidents involving AVs, some of which may be catastrophic, product liability litigation¹ is inevitable, especially in cases where conventional vehicles would not have crashed. The threat of massive product liability litigation involving AVs is widely perceived as one of the chief obstacles to AV development and sales, if not the number one threat [3].² Some believe that product liability suits may be an existential threat to autonomous driving [33].³ Crippling suits could force manufacturers to exit the market and may deter some manufacturers from entering the market because of a belief that the sales are not worth the risk. If these dire predictions come to pass, the U.S. and other parts of the world experiencing a flood of lawsuits may lose the use of a technology that would save many times more lives than it would endanger. If, however, the industry finds effective ways to manage the risk of product liability, it can bring to market a lifesaving technology while maintaining practices to minimize accidents and resulting liability, as well as the profitability needed to offer AVs in the market over time.

The purpose of this chapter is to identify product liability risks in the U.S. to manufacturers of AVs, the source of those risks, and how manufacturers can manage those risks. A focus on U.S. product liability is important from a worldwide manufacturer's perspective given the size of the U.S. market and the perception that the U.S. is a litigious country. Product liability is perceived as a greater threat in the U.S. than in any other country of the world. Section 26.2 discusses the circumstances giving rise to U.S. product liability litigation and the phenomenon of some U.S. cases resulting in huge awards to plaintiffs seeking compensation. It explains why these huge awards occur. Section 26.3 analyzes the human and financial impacts of more recent high profile product liability cases. Section 26.4 discusses U.S. product liability law, focusing on the types of claims and defenses arising in product liability cases. Section 26.5 covers design practices and procedures that manufacturers can use to reduce the risk of product liability, the use of

¹ This chapter focuses mainly on product liability litigation, although there are also requirements to compel vehicle manufacturers to recall their vehicles to fix defects. The management of liability and recall risks overlap and the risk management principles discussed in this chapter apply to both.

² "Some of the largest obstacles to autonomous consumer vehicles are the legalities [3]." Reports from Lloyd's of London and the University of Texas listed product liability as among the top obstacles for AVs [21] [30].

³ "[T]he worst outcome would be that said liability isn't sorted out so that we never do get the mass manufacturing and adoption of driverless cars." [33]

insurance as a means of shifting and managing product liability risk, and other risk management techniques.

26.2 Why do product liability suits occur?

First and foremost, manufacturers face product liability suits, because their products are involved in accidents. From the early days in the development of Anglo-American tort⁴ law, the road accident played a prominent role. A key British case in the development of U.S. tort law, *Winterbottom v. Wright*,⁵ involved a mail coach driver who was thrown from his horse-drawn mail carriage after it broke down, allegedly due to the defendant contractor's failure to maintain the carriage in a safe condition [32].⁶

Starting in the 20th century, the car accident caused significant changes in U.S. product liability law. "Products liability, like America, grew up with the automobile. Prior to the entry of motorcars onto the nation's highways, 'there simply were not large numbers of product-related lawsuits.' Once America embraced the automobile, it inevitably embraced automotive products suits as well." [13] Two of the most significant products liability cases in American history arose from auto accidents. In *MacPherson v. Buick Motor Co.*, the famous American jurist Benjamin Cardozo writing for the New York Court of Appeals upheld a verdict for a car owner ejected from his Buick car after a defective wooden wheel on the car collapsed [22].⁷ In *Henningsen v. Bloomfield Motors, Inc.* [17],⁸ the New Jersey Supreme Court affirmed a jury verdict against Chrysler and a dealer after the wife of the purchaser had an accident. She testified that she felt something crack in the car, the steering wheel spun sharply, the car veered off the road, and the car struck a highway sign and brick wall.

The threadbare descriptions of the car accidents in these appellate courts' decisions, however, do not reflect the reality of the trial setting in which lawyers for the injured plaintiffs will describe what might be a catastrophic car accident in unvarnished and sometimes horrific terms. Consider a description of the famous Ford Pinto accident written in Mother

4 "Tort" means "wrong," and "tort law" provides a mechanism for a plaintiff to seek redress in a civil (*i.e.*, non-criminal) case.

5 It was common in the 19th century for American courts to cite contemporary British cases as precedents.

6 In *Winterbottom*, the court denied relief to the injured coachman because of a lack of direct contractual relationship, called "privity," between the plaintiff coachman and the defendant contractor. The coachman was not a party to the contract in which the defendant contractor promised to maintain the coach in good working order [32].

7 The plaintiff had bought the car from a retailer, but could still sue the manufacturer despite the lack of privity with the manufacturer [22]. The car was apparently going 8 miles per hour at the time of the accident [13].

8 The court rejected privity, a warranty disclaimer, and limits of liability as defenses to the warranty claim of the wife driver of the car and her husband, the owner [17].

Jones magazine. Although the description below comes from a writer,⁹ it is similar in tone and impact to what a plaintiff's lawyer might say about his or her client in an opening statement. Here is how the writer describes the accident:

[A] woman, whom for legal reasons we will call Sandra Gillespie, pulled onto a Minneapolis highway in her new Ford Pinto. Riding with her was a young boy, whom we'll call Robbie Carlton. As she entered a merge lane, Sandra Gillespie's car stalled. Another car rear-ended hers at an impact speed of 28 miles per hour. The Pinto's gas tank ruptured. Vapors from it mixed quickly with the air in the passenger compartment. A spark ignited the mixture and the car exploded in a ball of fire. Sandra died in agony a few hours later in an emergency hospital. Her passenger, 13-year-old Robbie Carlton, is still alive; he has just come home from another futile operation aimed at grafting a new ear and nose from skin on the few unscarred portions of his badly burned body. [11]

In the courtroom, the young boy, so badly disfigured by the accident, would likely be sitting next to his attorney during the entire trial. The jury would be seated facing him, and watching him. The unspoken testimony of his catastrophic injuries would likely have at least an unconscious effect on the jurors watching him. Despite instructions from the judge not to permit sympathy, bias, or prejudice to sway their verdict, a car manufacturer defending this case would have a difficult time at trial. In the Ford Pinto case, the 13-year-old boy, whose real name was Richard Grimshaw, received a jury award in the amount of over \$2.5 million in compensatory damages and an award of punitive damages to punish and deter Ford in the amount of \$125 million [15]. Part of the motivation for the large verdict was evidence during the trial of Ford's apparently cold-hearted decision not to use fairly inexpensive parts in its cars that would have prevented the accident. Although the punitive damages award was later reduced in this case to \$3.5 million [15], the Ford Pinto case shows the kind of award that is possible in an automobile product liability case following a catastrophic accident.

At some future time when an AV manufacturer faces a product liability trial, we can expect to see accident victims seated in a courtroom with similar gruesome disfigurements and stories of out-of-control cars and tragic, frightful accidents. The defendant manufacturer's engineering and business practices will come under scrutiny. And a jury will likely decide whether or not the manufacturer should be held responsible for the accidents.

During an AV's design phase, its manufacturer's design team will have an opportunity to discuss and make engineering and business decisions about the design of its AVs. Team members will talk about safety efforts the manufacturer is willing to undertake. In these discussions, team members can think more clearly and assess risk more effectively by imagining themselves in a courtroom setting, defending their practices in litigation arising from a catastrophic accident.

⁹ The writer is using pseudonyms for the names of the crash victims, evidently before the names of the victims became public.

Why are jurors willing to render these large verdicts against manufacturers? The short answer is juror anger. “Angry jurors mean high damages.” [24] More specifically, juries render large verdicts when they become angry at defendants’ conduct. When juries become angry, the only way that they see they can redress the defendants’ wrongs is to render very large verdicts against them in an effort to send a message that their conduct is unacceptable.

In the Ford Pinto case, the jury heard evidence that Ford had known about the problems with its fuel system. Ford had found the problem of rear-end crashes splitting open the Pinto’s gas tank. In addition, Ford knew that a part costing \$11 could have prevented the accident. Nonetheless, Ford made a cost/benefit analysis comparing the overall cost of adding the safety part to the vehicle against the value of the lives lost from accidents involving the vulnerability. Ford assigned a value to each human life likely lost. And Ford decided that the overall cost of the part exceeded the overall value of the human lives that would be saved and determined that it therefore should not add the part to the Pinto’s design.

Ford’s cost/benefit calculation seemed odious to the jury because it placed a dollar value on human life. In addition, the jury knew that the extra part would only cost \$11. By not adding the part to the Pinto’s design, the jury evidently concluded that Ford placed its profits ahead of human life. Ford’s apparent callousness led to the jury anger [15].

In another famous product liability case, a Texas lawyer obtained a \$253.5 million verdict against pharmaceutical company Merck for Carol Ernst, the widow of Robert Ernst. Mr. Ernst died after having taken Merck’s painkiller Vioxx for eight months [5]. The jury saw internal Merck documents showing that the company was aware of the heart attack risk to users before it started marketing the drug. The documents gave the jury the impression that the company cared more about profits than public safety. As a result, the jury tried, via the huge award, to send a message that it is wrong to hide information about a drug’s danger [14]. Although an appellate court later overturned the jury’s verdict, again the case underscores the risk of huge product liability verdicts [23].

26.3 More recent high-profile product liability litigation

As noted in the previous section, appellate courts provided some relief to Ford and overturned the verdict in the Vioxx case. Nonetheless, manufacturers should look to two more recent sets of cases in order to analyze the potential human and financial impact of product liability issues. Section 26.3.1 covers the so-called “sudden acceleration” phenomenon involving Toyota cars. Section 26.3.2 describes the fallout from the General Motors ignition switch defects. These two cases show how manufacturers may need to pay huge sums to resolve product liability legal proceedings, which are in addition to the human toll of deaths and injuries.

26.3.1 “Sudden acceleration” litigation

Several years ago, news stories emerged concerning a phenomenon in which Toyota drivers reported that their cars accelerated without warning and were difficult to stop, resulting in accidents. One typical news report stated, “Nancy Bernstein feels lucky to be alive after her Toyota Prius kept accelerating, no matter how hard she hit the brakes. ‘The car’s going about 70 miles an hour, and I’m beginning to get scared because it’s not slowing down,’ Bernstein described.” [26]. Lawsuits followed these accidents, and federal cases were transferred to the U.S. District Court for the Central District of California for coordinated or consolidated pretrial proceedings [27].

Some reports contend that the 89 people may have died from accidents involving the sudden acceleration of Toyota vehicles [10]. Governmental investigations, however, showed no evidence that design or implementation flaws in Toyotas caused unintended acceleration [25]. Accordingly, there was some controversy about whether Toyota or drivers were at fault in these accidents.

Later in the litigation, however, a report by expert witness Michael Barr following additional research opined that a software malfunction occurred in one of the cars and that the malfunction resulted in unintended acceleration [4]. Barr identified numerous alleged problems with the software, which according to Barr, Toyota’s own engineers had trouble understanding and characterized as “spaghetti like” [4]. Barr testified about his findings in an Oklahoma state court case and, apparently based in part on these findings, the jury in the case awarded compensatory damages of \$1.5 million to the driver and \$1.5 million to the family of a passenger who died in the crash [35]. The parties in the case, *Bookout v. Toyota Motor Corp.* [7], settled the case right before a second phase of the trial to consider punitive damages against Toyota [18].

Despite the uncertainty about what really caused these accidents, Toyota started to settle the various legal actions against the company. The Oklahoma case may have been a motivating factor [28].¹⁰ Toyota’s settlement payments so far include:

- \$1.6 billion to settle financial loss claims in the multidistrict litigation [28].
- \$1.2 billion to settle potential criminal charges against Toyota [29].
- \$25.5 million to settle shareholder claims arising the failure to report safety issues [29].
- \$65 million in fines for violations of federal vehicle safety laws [29].

These settlement payouts are in addition to the numerous product liability lawsuits that remain pending, the settlement of which presumably will cost a huge sum. If product liability settlement amounts exceed \$1 billion, then the total settlements may exceed \$4 billion. The cost of legal fees and other internal expenses related to investigation and remedial measures will add even more to the final cost for Toyota.

¹⁰ “Legal analysts said that the verdict most likely spurred Toyota to pursue a broad settlement of its remaining cases.” [28]

26.3.2 General Motors ignition switch issues and recall

Another high-profile product liability issue arose from the recently uncovered problem with ignition switches in certain General Motors cars. In the late 1990s, GM started using new switches for small cars to make them work more smoothly. “But as it turns out, new switches in models such as the Chevrolet Cobalt and Saturn Ion can unexpectedly slip from ‘run’ to ‘accessory,’ causing engines to stall. That shuts off the power steering, making cars harder to control, and disables air bags in crashes [20]. The problem supposedly caused over 50 accidents. “GM says the problem has caused at least 13 deaths, but some members of Congress put the death toll near 100.” [20]

Apparently, GM engineers were aware of the problem before the accidents, but decided not to replace the switches. An internal email uncovered in Congressional hearings discussed the fact that a more robust design would add 90 cents to the price of the switch, and would only save 10-15 cents in reduced warranty claims [16]. “The part costs less than \$10 wholesale. The fix takes less than an hour. A mechanic removes a few screws and connectors, takes off a plastic shroud, pops in the new switch, and the customer is back on the road.” [12] “[T]o many people familiar with the automaker,” the reason GM did not recall the cars sooner “is a corporate culture reluctant to pass along bad news. When GM was struggling to cut costs and buff its image, a recall of its popular small cars would have been a terrible setback.” [12] “It’s pretty clear that somebody somewhere was being penny-wise and pound-foolish,” said Marina Whitman, a professor at the University of Michigan and a former economist at GM.” [12]

GM’s decision not to recall the cars sooner is proving to be a costly one. Congress, safety regulators, the U.S. attorney in New York City, the SEC, Transport Canada, and 45 state attorneys general are conducting probes of GM. GM is undertaking a costly recall of the cars. Also, GM created a compensation fund for families of crash victims, which it expects will cost the company \$400 million to \$600 million [19].

In addition to the compensation fund, GM said that it will spend \$1.2 billion to repair the cars and trucks recalled during the second quarter, on top of the \$1.3 billion it identified for repair costs in the first three months of the year. In addition, the company set aside an additional \$874 million in the quarter for future recalls. [19]

The total expense for GM will be huge: “All told, GM’s recalls have cost the automaker nearly \$4 billion this year.” [19] Presumably, GM will continue to pay more in future years as well. Moreover, GM will have to pay even more for legal fees and other internal expenses related to investigation and remedial measures.

26.4 Claims and defenses in product liability cases

Having covered the phenomenon of product liability litigation, the human toll of accidents, and the large financial risks involved, this section covers what plaintiffs must prove in order to prevail in a suit based on an allegedly defective product, as well as what defendants must prove in order to assert certain defenses. Typical claims for plaintiffs seeking damages for bodily injury or property damage from an accident are “strict product liability,” “negligence,” and “breach of warranty.”¹¹ Most of the law governing product liability in the U.S. is state law, as opposed to federal law, and laws diverge from state to state.

26.4.1 Strict product liability claims

The easiest type of claim for a plaintiff to prove is a so-called “strict product liability” claim. A plaintiff can include in the suit almost every business in the chain of distribution from raw materials or component part manufacturers to manufacturers of the finished product, distributors, and retailers [13]. Strict liability refers to liability for defective products without fault on the part of the manufacturer and regardless of whether or not there is a contractual relationship between the plaintiff and defendant. Laws vary significantly from state to state, and some states do not even recognize strict liability as a viable claim. Nonetheless, most states’ statutory and common law strict liability laws are based on the formulation of strict liability under Section 402A of the Second Restatement of Torts [2].¹² As stated in the Restatement, in order to win a strict liability claim, the plaintiff must prove at trial:

- The defendant sold the product in question,
- The defendant is in the business of selling this kind of product,
- The product was defective and unreasonably dangerous at the time it left the defendant’s hands,
- The product is expected to and does reach the user or consumer without substantial change in the condition in which it is sold, and
- The defect was the proximate cause of the plaintiff’s injuries [2].

The key issue for AV strict liability design defect claims will be whether the vehicle was “defective.” A plaintiff may assert that the product was defective in its design, the product was defective in the way it was manufactured, and/or that the defendant failed to provide

11 Another theory of recovery for plaintiffs is fraud, also known as “deceit” or “misrepresentation,” and is based on false statements made by the seller about a product. Misrepresentations may be intentional, negligent (careless), or innocent. This type of claim, however, is the least used theory of recovery in the product liability context [13].

12 “More than three quarters of American jurisdictions incorporate all or part of this section in their own distinct brand of strict liability.” [13] Restatements of law summarize an area of law in the U.S., but do not themselves have the force of law.

adequate warnings or instructions to the users of the product. Of greatest concern for AV litigation are design defect and failure to warn claims.

A plaintiff asserting a design defect would show the existence of a “defect” under the applicable state law test. Courts in the U.S. apply one of the following tests:

- A test based on what an ordinary consumer would expect from a product, typically used where the potential for injury is clear to consumers from the nature of the product.
- The risk-utility balancing test, where the plaintiff contends that the risks from a design outweigh the benefits to the consumer or public from a design.
- The product manufacturer test, which asks whether a reasonably prudent manufacturer or seller, aware of the product’s dangerous condition, would not have put the product on the market if it had been aware of the product’s condition.
- A combination test, which may shift the burden of proof to the manufacturer to show a lack of defect in certain situations.
- The ultimate issue approach, in which the jury has the discretion to determine whether a design is defective [31].

Frequently, a plaintiff asserting a design defect will use expert testimony to explain why the defendant’s design is defective and will attempt to prove that an alternative design could have prevented the accident.

In addition to relying on design defects, a plaintiff may also assert a strict liability claim based on a “failure to warn” theory. Under this theory, the plaintiff could contend that an AV was defective because the defendant failed to provide adequate warnings or instructions about the vehicle. The plaintiff would need to prove that the warnings did not adequately reduce risks associated with the product or that the instructions were inadequate to tell the user how to use the product.

26.4.2 Negligence claims

As an alternative claim, product liability plaintiffs often include a negligence claim in their complaints. The concept of “negligence” refers to careless conduct that falls below the standard of conduct to which a hypothetical “reasonable man” would adhere. As with strict liability, a plaintiff can assert a negligence claim based on the design of the product, the way in which the product was manufactured, or the failure to give adequate warnings or instructions. Negligence is a harder claim for a plaintiff than strict liability, because the plaintiff must show some degree of fault on the part of the defendant.

In order to prevail in a negligence claim, the plaintiff must prove:

- The defendant owed a duty of care to provide a reasonably safe product in terms of design or to warn of dangerous defects – meeting a standard of conduct to protect others against unreasonable risk,

- The defendant breached its duty of care by failing to conform its conduct to the standard of conduct required, and
- The defendant's conduct proximately caused the plaintiff's injury [31].

26.4.3 Breach of warranty claims

In most states in the U.S., a plaintiff may also include a breach of warranty claim in a product liability complaint. Warranties are affirmations or promises concerning a product or its performance, features, or characteristics, such as those concerning the safety of a product. The basis of a breach of warranty claim is that the seller's product does not perform as promised, or does not have the features or characteristics promised. Design defects, manufacturing defects, or failures to warn may all provide the basis for a warranty claim. As with strict liability, the question is whether or not the product adheres to the promises made, regardless of whether the seller is at fault for the failure to conform to the promise. Nonetheless, warranty claims are subject to defenses with various degrees of effectiveness, including the historical defense of "privity" (plaintiff's lack of contractual relationship with the defendant), the requirement that the plaintiff provide the seller notice of the breach, and the ability for sellers to disclaim warranties [31]. In most U.S. jurisdictions, purchasers of a product or their family members can sue companies in the chain of distribution under a warranty theory despite the lack of privity [31].

In order to assert a breach of warranty claim, a plaintiff must typically prove:

- The defendant made a warranty,
- The product did not comply with the warranty at the time of the sale,
- The plaintiff's injury was proximately caused by the defective nature of the product, and
- As a result, the plaintiff suffered damage [31].

A warranty claim will typically allege one of three kinds of warranties. "Express warranties" are those actually stated by the seller, such as in a sales contract, warranty program documentation, advertisements, or sales collateral. They may be written or oral. In addition to the express warranties, the law will sometimes recognize two kinds of "implied warranties" regarding the sale of consumer products that arise by operation of law, as opposed to anything the seller actually said.

One kind of implied warranty is the "implied warranty of merchantability." This implied warranty requires the seller to make sure the product is fit for the ordinary purposes of such product. For instance, a consumer would expect that the head of a hammer would not fly off the first time it is used after purchase. This kind of implied warranty is the one most likely to be asserted against a seller of an AV in future cases. The second typical implied warranty is the "warranty of fitness for a particular purpose." Where the seller knows the particular purpose for which the consumer will use the product, and the buyer is relying on

the skill and judgment of the seller to select and furnish suitable products, the law will recognize an implied warranty that the product will be fit for that purpose. For instance, if a truck buyer tells a dealer's sales representative that the buyer seeks a pickup that will be able to tow a trailer through mountainous off-road terrain, then the dealer is deemed to have warranted that the truck recommended by the sales representative can, in fact, tow the trailer off-road in the mountains.

26.4.4 Claims under consumer protection laws

Plaintiffs sometimes assert product liability claims under various consumer protection laws. State laws vary, and some states do not permit these laws to be used for personal injuries [1]. They are commonly used when plaintiffs seek redress for alleged economic or financial losses, such as the diminution in the value of their products due to the alleged defect. Examples include California's Unfair Competition Law (UCL) [8], False Advertising Law (FAL) [8], and Consumer Legal Remedies Act (CLRA) [9], as well as equivalent laws in other states. Claims under these statutes typically require plaintiffs to prove:

- A violation of the statute occurred
- That causes
- Injury to a consumer.

For instance, the UCL prohibits unlawful, unfair, or fraudulent business acts or practices. The FAL bars untrue or misleading advertising practices. The CLRA prohibits a list of unfair business practices, such as misrepresenting the characteristics and qualities of a product.

26.4.5 Types of defects at issue in autonomous vehicle litigation

We do not yet have examples of cases filed against AV manufacturers to say what kinds of alleged defects will likely result in litigation. Nonetheless, the history of automotive litigation, discussions with those in the industry, and judgments about what is likely to come suggest that there will be many sources of potential defects that may give rise to product liability litigation. AVs will share some of these sources of defects with conventional vehicles, but some of them will be unique to AVs. The lists of potential defects in this section are not meant to be exclusive, and there are many possible sources of defects in conventional and autonomous vehicles.

Some possible design defects¹³ that AVs will have in common with conventional vehicles include:

¹³ Another issue for manufacturers of finished products concerns their supply chains. Counterfeit or defective components may introduce manufacturing defects into AVs.

- Mechanical or physical defects in various systems of the vehicles or their safety equipment, such as the use of materials that are not strong or thick enough,¹⁴ or an excessively high center of gravity subjecting the vehicle to rollovers.
- Defects in electrical components or systems other than sensors or control systems for autonomous driving, such as the use of wrong kind of components, problems in the performance of the components, or the lack of durability of the components.
- Software¹⁵ defects relating to systems other than sensors or control systems for autonomous driving, including information security vulnerabilities.

These defects will occur in both conventional and autonomous vehicles and thus existing law and litigation methods would apply to determine a manufacturer's liability.

Nonetheless, AVs may experience defects that conventional vehicles do not. Again, they may be mechanical, electronic, or software.

- Mechanical or physical defects in the control systems for autonomous mode or the sensors used by the autonomous systems. A simple example would be weak mountings for LIDAR sensors which, if they failed, might cause the AV to lose its sensor data suddenly and crash.
- Defects in electrical components for sensors or control systems for autonomous driving.
- Software defects in the sensors or control systems used for autonomous mode.

The most interesting and perhaps most concerning potential defects are those in the software used for autonomous driving. Some examples include:

- Designs that depend on inadequate data from sensors, including insufficient amount, inaccuracy, deficient precision, or inadequate speed of data input.
- Inaccurate pattern recognition, such as the AV failing to be able to recognize a pedestrian in the road or other upcoming obstacles or hazards.
- Designs that fail to perform safe ordinary maneuvers such as turns, lane-keeping, distance-keeping, and merging.
- Other problems with autonomous behavior, such as unpredictable changes in speed or direction.
- Deficient collision avoidance algorithms.
- Information security vulnerabilities.
- Defects arising from inadequate human-computer coordination. For instance, if an AV switches between autonomous and manual mode, the AV must alert the driver before switching to manual mode and transition to human control safely.

14 For example, the author was involved in one case in which the plaintiff alleged that the metal in a car's tie rod was not strong enough, the metal fatigue experienced by ordinary wear of the car weakened the tie rod, and an accident occurred because metal fatigue caused the tie rod to break.

15 The "software" involved may be in the form of code built into hardware or firmware.

Moreover, Chapter 4 discusses design decisions programmers must make when creating the logic for an AV to handle the situation of when a collision is imminent and unavoidable and there is a choice between striking and harming different persons. For instance, an AV may face the dilemma of striking a motorcycle rider wearing a helmet or one without a helmet, and a programmer might decide that it is better, if a collision is unavoidable, to strike one or the other. If the programmer makes such a decision and designs the software to implement that decision, this kind of design decision could be the subject of a product liability suit from the person struck by operation of the software.

26.4.6 Defenses in product liability cases

Defendants may assert a number of defenses against a product liability case. The most common types of defenses relate to the conduct of the plaintiff. In some cases, the defendant contends that the plaintiff's negligent conduct caused or contributed to an accident. The viability of a defense based on a plaintiff's own negligence depends on state law and the type of claim, but a defendant may also use it as evidence of a superseding cause of an accident. In addition, some accidents occur because a plaintiff misused or modified a product. In some cases, a plaintiff is said to have "assumed the risk" of an open, obvious hazard, such as the possibility of being struck by a golf ball on the links. Finally, a plaintiff may not be able to recover all damages if he or she failed in some way to mitigate the damages.

Many of these defenses may have limited application to persons driving AVs in autonomous mode. If the plaintiff was not in control of the vehicle at the time of the accident, the plaintiff could not have driven carelessly. Once AVs enter the mass market, a seller cannot realistically contend that the plaintiff assumed the risk of driving a vehicle using new and untested technology. Nonetheless, it is likely over time that some people will modify their AVs or try to abuse the sensors or control systems for fun. In these cases, if an accident occurs, the defendant may point to this conduct as a defense. Moreover, defenses based on a plaintiff's conduct could reduce or bar a plaintiff's recovery when the plaintiff was not a driver of the AV, such as a pedestrian carelessly (or intentionally) darting out in front of an AV faster than any human or machine could react.

The other key defense in AV litigation will likely be a "state of the art" defense to a design defect claim. The basis of this defense is that the manufacturer could not have produced a safer design at the time of sale because safer designs were not technologically feasible then. Such a defense is valid in some states while not in others [13].¹⁶

¹⁶ Another typical product liability-specific defense is the economic loss doctrine, which bars product liability tort claims where the claimed damages are financial and not for bodily injury or damage to property other than the product itself. Moreover, federal law may preempt some state law claims, because U.S. federal law trumps state laws inconsistent with it. Also, if a product is meant to be used by a "sophisticated user" or provided by a "sophisticated intermediary," the seller may have a defense under certain circumstances, although this defense is unlikely to apply to AVs. Finally, if a manufacturer creates a product pursuant to government specification, it may have a "government contractor defense."

26.5 Managing the risk of autonomous vehicle product liability

Having covered the nature of product liability, the potentially huge exposure for losses, juror anger that leads to huge jury verdicts, and the nature of product liability, I now turn to the issue of how manufacturers can manage the risk of product liability litigation.¹⁷ First and foremost, managing these risks requires a proactive approach. By planning today, manufacturers can be prepared for the inevitable suits later. First, planning can enable them to make safer products that are less likely to cause litigation-triggering accidents in the first place. Second, by planning ahead, manufacturers can increase their chances of winning the cases that accidents do trigger. A proactive approach to design safety with a comprehensive risk management program establishes upfront a manufacturer's commitment to safety. When the inevitable suit happens later, the manufacturer's counsel has a story to tell the jury as to why its products were safe and how the manufacturer cared about safety.

Second, manufacturers should consider the commitment they make to product safety using such a proactive approach. One commentator stated, "The most effective way for [counsel for] a corporate defendant to reduce anger toward his or her client is to show all the ways that the client went *beyond what was required by the law or industry practice*." [24]. Meeting minimum standards is insufficient because of juror skepticism about the rigor of standards set or influenced by industry and because jurors expect corporate clients to know more about product safety than a "reasonable person" – the standard for judging the conduct of defendants under the law [24]. "A successful defense can also be supported by walking jurors through the relevant manufacturing or decision-making process, showing all of the testing, checking, and follow-up actions that were included. Jurors who have no familiarity with complex business processes are often impressed with all of the thought that went into the process and all of the precautions that were taken." [24] Even though accidents do occur, and in any trial setting an accident or problem did occur, a defendant's proactive approach would show the jury that the manufacturer tried hard to do the right thing [24]. Consequently, efforts to go above and beyond the minimum standards would diffuse juror anger and mitigate the manufacturer's risk.

Third, manufacturers should recognize that risk management is a process that begins with a careful risk analysis looking at the types, likelihood, and impact of issues in the design of AVs. Once a risk assessment is complete, they can review the results and analyze changes in design and engineering practices to address these issues, prioritize risks and risk mitigation measures, and implement the prioritized risk mitigation measures [34]. In connection with the risk management process, manufacturers can obtain guidance from a number of standards bearing on risk management and safety:

¹⁷ I speak here of product liability litigation, although the risk management techniques here also apply to preventing the need for costly product recalls.

- ISO 31000 “Risk management – Principles and guidelines” (regarding the risk management process).
- Software development guidelines from the Motor Industry Software Reliability Association.
- IEC 61508 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (safety standard for electronic systems and software).
- ISO 26262 family of “Functional Safety” standards implementing IEC 61508 for the functional safety of electronic systems and software for autos.

While adherence to the principles of international standards does not guarantee that an AV manufacturer will avoid liability, adherence to standards bolsters the credibility of a manufacturer’s risk management program. Moreover, the standards provide a framework by which manufacturers can build a set of controls for their risk management process. Consequently, an AV safety program built on international standards lays the foundation for a later defense of a manufacturer accused of building an unsafe AV.

Fourth, AV manufacturers should obtain insurance coverage to manage product liability risk. A robust insurance program will permit manufacturers to shift the risk of product liability to insurance carriers who will, under issued policies, defend and indemnify manufacturers for settlements and judgments paid to resolve third party claims. Currently, the insurance industry is just beginning to come to grips with the insurance implications of AVs [21]. We can expect to see the insurance industry provide third party coverage to manufacturers for accidents, and probably privacy and information security risks as well. While the industry has no historical data for an actuarial approach to underwriting AV risks, the industry will probably look by analogy to conventional vehicles and mobile devices for loss experiences [6]. AV manufacturers can find carriers willing to write bespoke policies tailor-made to their needs. Eventually other carriers will enter the market and offer more standardized policies, thereby reducing premium costs to manufacturers over the long run.

Fifth, manufacturers can work together on industry risk management initiatives, such as:

- Participation in standards efforts to promote safety and security within the industry and among component manufacturers;
- Collaborating with other manufacturers in trade groups and (subject to antitrust concerns) purchasing consortia; with the purchasing power of larger numbers of manufacturers, the industry may have greater leverage with component manufacturers to promote safe design and manufacturing processes; and
- Participation in information sharing groups that can collaborate to develop best practices to improve product safety.

Sixth, manufacturers can manage the risk of huge jury awards by certain pre-litigation strategies. For instance, they may want to engage jury consultants that assist the defense of product liability cases to identify risk factors for the manufacturer and the types of conduct that trigger juror anger. In addition, manufacturers may want to identify and cultivate a

group of defense experts they can use to educate jurors about various engineering, information technology, and safety considerations. Moreover, counsel for manufacturers may want to join specialty bars for defense counsel for purposes of sharing information, briefs, and other work product.

Finally, manufacturers can maximize their success in future product liability trials by focusing on effective records and information management (RIM). Effective RIM may win cases, while poor RIM may lose cases. Documents and records produced contemporaneously with the management of a safety program can corroborate the testimony of witnesses, provide a historical record documenting a manufacturer's safety efforts, and send the message that the manufacturer cares about safety.

26.6 Conclusions

One of the top, if not the top, challenge autonomous vehicle manufacturers face is the risk of product liability suits and recalls in the wake of accidents resulting in deaths and catastrophic injuries. Lawsuits in which manufacturers appear callous, placing profits over safety, face the risk of huge liabilities. Recent reports about "sudden acceleration" in Toyota cars and problems with General Motors' ignition switches show that these companies are paying multiple billions of dollars to resolve legal claims. Plaintiffs have a number of claims they can assert against AV manufacturers, although manufacturers may have defenses as well. Various kinds of defects may crop up with AVs, although problems with software, logic, autonomous behavior, and programmer decisions on AV behavior in crashes are top concerns. Nonetheless, manufacturers can manage product liability risk through careful planning, a strong commitment to safety, an effective risk management process beginning with a thorough risk analysis, adherence to international standards, obtaining robust insurance coverage, collaboration with other manufacturers, pre-litigation legal strategies, and effective records and information management practices. In sum, the threat of crippling product liability litigation in the United States poses a profound concern for manufacturers of autonomous vehicles, but starting proactive engineering design strategies for safety risk management and legal strategies to anticipate future litigation now can place manufacturers in the best position to maximize product safety and minimize product liability in upcoming decades.

References

1. ALEE, JOHN, et al., *PRODUCT LIABILITY* § 18.02 (2014)
2. American Law Institute, *Restatement (Second) of Torts* § 402A(1) (1965)
3. Autonomous Solutions Inc., 5 Key Takeaways from AUVSI's Driverless Car Summit 2012 (Jul. 12, 2012)
4. Barr, Michael, Rule 26(a)(2)(B) Report of Michael Barr April 12, 2013 in *Estate of Ida St. John v. Toyota Motor Corporation, et al.*, 39, 54, 65 (Apr. 12, 2013)

5. Berenson, Alex, *Vioxx Verdict Raises Profile of Texas Lawyer*, N.Y. TIMES, Aug. 22, 2005, available at <http://www.nytimes.com/2005/08/22/business/22lawyer.html?pagewanted=all>
6. Beyer, David et al., *Risk Product Liability Trends, Triggers, and Insurance in Commercial Aerial Robots* 20 (Apr. 5, 2014) (describing nascent insurance coverage for drones), available at http://robots.law.miami.edu/2014/wp-content/uploads/2013/06/Beyer-Dulo-Townsley-and-Wu_Unmanned-Systems-Liability-and-Insurance-Trends_WE-ROBOT-2014-Conference.pdf
7. *Bookout v. Toyota Motor Corp.*, No. CJ-2008-7969 (Okl. Dist. Ct. Okl. Cty. dismissed Nov. 20, 2013)
8. Cal. Bus. & Prof. Code §§ 17200 et seq., 17500 et seq.
9. Cal. Civ. Code § 1750 et seq.
10. CBS News and Associated Press, Toyota “Unintended Acceleration” Has Killed 89, CBS NEWS (May 25, 2010), <http://www.cbsnews.com/news/toyota-unintended-acceleration-has-killed-89/>
11. Dowle, Mark, *Pinto Madness*, MOTHER JONES, Sept. 1977, available at <http://www.motherjones.com/print/15406>
12. Fletcher, Michael & Mufson, Steven, *Why did GM take so long to respond to deadly defect? Corporate culture may hold answer*, WASH. POST, Mar. 30, 2014, available at http://www.washingtonpost.com/business/economy/why-did-gm-take-...swer/2014/03/30/5c366f6c-b691-11e3-b84e-897d3d12b816_story.html
13. FRUMER, LOUIS R., ET AL., PRODUCTS LIABILITY §§ 1.02, 2.04, 2.05[1], 5.01, 8.04 (2014)
14. Girion, Lisa and Calvo, Dana, *Merck Loses Vioxx Case*, L.A. TIMES, Aug. 20, 2005, available at <http://articles.latimes.com/2005/aug/20/business/fi-vioxx20>
15. *Grimshaw v. Ford Motor Co.*, 119 Cal. App. 3d 757, 771–72, 813, 823–24 (1981)
16. Hendler, John, email to Lori Queen et al. (Sept. 28, 2005, 4:07 pm), <http://docs.house.gov/meetings/IF/IF02/20140618/102345/HHRG-113-IF02-20140618-SD036.pdf>
17. *Henningsen v. Bloomfield Motors, Inc.*, 32 N.J. 358, 161 A.2d 69 (1960)
18. Hirsch, Jerry, *After losing verdict, Toyota settles in sudden acceleration case*, L.A. TIMES, Oct. 25, 2013, available at <http://articles.latimes.com/2013/oct/25/autos/la-fi-hy-toyota-settles-sudden-acceleration-20131025>
19. Isidore, Chris, *GM to pay victims at least \$400 million*, CNN MONEY, Jul. 24, 2014, available at <http://money.cnn.com/2014/07/24/news/companies/gm-earnings-recall/>
20. Krisher, Tom, *GM’s ignition switch: what went wrong*, COLUMBUS DISPATCH, Jul. 8, 2014, available at <http://www.dispatch.com/content/stories/business/2014/07/08/gms-ignition-switch-what-went-wrong.html>
21. Lloyd’s, *Autonomous Vehicles Handing Over Control: Opportunities and Risks for Insurance* 8 (2014)
22. *MacPherson v. Buick Motor Co.*, 217 N.Y. 382, 111 N.E. 1050 (1916)
23. *Merck & Co., Inc. v. Ernst*, 296 S.W.3d 81 (Tex. Ct. App. 2009), cert. denied, 132 S. Ct. 1980 (2012)
24. Minick, Robert D. & Kagehiro, Dorothy K., *Understanding Juror Emotions: Anger Management in the Courtroom*, FOR THE DEFENSE, July 2004, at 2, 3 (emphasis added), available at http://www.krollontrack.com/publications/tg_forthedefense_robertminick-dorothyhagehiro070104.pdf
25. National Highway Traffic Safety Administration, Technical Assessment of Toyota Electronic Throttle Control (ETC) Systems 57–60, 62–64 (Feb. 2011); see NASA Engineering and Safety Center, Technical Support to the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) on the Reported Toyota Motor Corporation (TMC) Unintended Acceleration Investigation 170–172 (Jan. 18, 2011)
26. Romero, Ric, *Sudden Acceleration Issue Spans Beyond Toyota*, 6ABC.COM (Jan. 4, 2010), <http://6abc.com/archive/7200572/>
27. *Toyota Motor Corp. Unintended Acceleration Marketing, Sales Practices, and Products Liability Litigation*, No. 8:10-ML-2151 JVS (FMO) (C.D. Cal. filed Apr. 12, 2010) (cases consolidated)

- by the Judicial Panel on Multidistrict Litigation in the U.S. District Court for the Central District of California)
28. Trop, Jaclyn, *Toyota Seeks a Settlement for Sudden Acceleration Cases*, N.Y. TIMES, Dec. 13, 2013, available at http://www.nytimes.com/2013/12/14/business/toyota-seeks-settlement-for-lawsuits.html?_r=0
 29. Undercoffler, David, *Toyota and Justice Department said to reach \$1.2 billion settlement in criminal case*, L.A. TIMES, Mar. 18, 2014, available at <http://www.latimes.com/business/autos/la-fi-hy-autos-toyota-justice-department-settlement-20140318-story.html>
 30. University of Texas, *Autonomous Vehicles in Texas* 5 (2014)
 31. VARGO, JOHN, PRODUCTS LIABILITY PRACTICE GUIDE §§ 6.02[1], 6.02[4], 6.03[1], 6.04 (2014)
 32. *Winterbottom v. Wright*, 152 Eng. Rep. 402 (1842)
 33. Worstall, Tim, *When Should Your Driverless Car From Google Be Allowed To Kill You?*, FORBES, available at <http://www.forbes.com/sites/timworstall/2014/06/18/when-should-your-driverless-car-from-google-be-allowed-to-kill-you> (Jun. 18, 2014)
 34. Wu, Stephen, *Risk Management in Commercializing Robots* 6–8 (Apr. 3, 2013), available at <http://conferences.law.stanford.edu/werobot/wp-content/uploads/sites/29/2013/04/Risk-Management-in-Commercializing-Robotics.pdf>
 35. Yoshida, Junko, *Toyota Case: Single Bit Flip That Killed*, EE TIMES, Oct. 25, 2013

Bryant Walker Smith

Content

27.1 Introduction 594

27.1.1 In Context 594

27.1.2 What Is Risk? 595

27.1.3 What is Regulation? 596

27.1.4 The Regulatory Challenge 597

27.2 Ensure Compensation 597

27.2.1 Expand Public Insurance 597

27.2.2 Facilitate Private Insurance 598

27.3 Force Information-Sharing 599

27.3.1 Privilege the Concrete 599

27.3.2 Delegate the Safety Case 600

27.4 Simplify the Problem 602

27.4.1 Limit the Duration of Risk 602

27.4.2 Exclude the Extreme 602

27.5 Raise the Playing Field 603

27.5.1 Reject the Status Quo 603

27.5.2 Embrace Enterprise Liability 606

27.6 Conclusion 607

References 608

B. W. Smith (✉)
University of South Carolina School of Law, USA
bryantws@civil.co.de

27.1 Introduction

27.1.1 In Context

Two complex and conflicting objectives shape altruistic regulation of human activity: maximizing net social good and mitigating incidental individual loss. Eminent domain provides a superficially simple example: To build a road that benefits ten thousand people, a government evicts – and compensates – the ten people whose homes are in the way. But in many cases, individual loss is not fully compensable, most strikingly when that loss involves death: Whatever her actual detriment, a person who dies cannot be “made whole.” And indeed, more than 30,000 people lose their lives on US roadways every year while more than 300 million obtain some direct or indirect benefit from motorized transport.

The promise that vehicle automation holds for highway safety raises difficult questions about regulation’s social and individual objectives. Analyzing either objective requires topical and temporal definition of a manageable system in which costs and benefits can be identified, valued, and compared. With respect to net social good, what is the statistical value of a human life? Is a reduction in organ donations a “cost” of safer highways? Could aggressive deployment of particular technologies cause a backlash that ultimately undermines safety? Similarly, with respect to individual loss, how should injury or death be valued? Should culpability affect compensation? Who is entitled to it? The particular answers to these questions may depend on the domain – law, economics, ethics, the social sciences – from which they are drawn.

Vehicle automation exposes tension between the social and individual objectives. Externalities frequently accompany innovation: Inventors impose costs that they need not or cannot bear and create benefits that they cannot capture. Compensation of incidental injury may be one such cost, and socially desirable innovations like automation might be subsidized by shielding them from it. Calibrating net social good and individual loss can also create moral hazard: Safety might be discounted by innovators who are legally or effectively exempt from rules and immunized from lawsuits or by consumers who are assured of compensation for injury.

This tension exists against two related background conditions. The first is a preference for the status quo – a tendency that is reflected in administrative law, in tort law, and internationally in the precautionary principle. Many vehicle fatalities appear only in local obituaries, but a single automated vehicle fatality would end up on national front pages. The second is a failure by imperfectly probabilistic humans to accurately perceive risk. Drivers who speed around blind corners but fear traveling over bridges demonstrate this tendency to underestimate some risks and overestimate others.

This complex regulatory context leads to two fundamental questions: How should risk be allocated in the face of significant uncertainty – and who should decide? The range of actors includes the legislative, executive, and judicial branches of national and subnational governments, companies, standards organizations, consumers, and the public at large. Regulation can be prospective or retrospective, but it cannot be nonexistent: Administrative

Table 27.1 Potential Regulatory Strategies

Ensure sufficient compensation for those who are injured	
Expand public insurance	Facilitate private insurance
Force information-sharing by the private sector to enhance regulation	
Privilege the concrete	Delegate the safety case
Simplify both the technical and the regulatory challenges in coordination	
Limit the duration of risk	Exclude the extreme
Raise the playing field for conventional actors along with automated systems	
Reject the status quo	Embrace enterprise liability

agencies that decline to establish safety requirements for automated vehicles merely leave this task to judges and juries after incidents have occurred.

The consequences of action or inaction are as stark as they are uncertain. Regulatory acts or omissions could cost lives in the near term by delaying or raising the price of automation technologies [28]. But they could also save lives in the longer term by protecting broad classes of innovation from the potential reputational damage that early tragedies or controversies could inflict. Charting the currents of abstract social gain and concrete human loss from vehicle automation requires appreciating the risks that regulation presents as well as those that it addresses.

This chapter first considers the nature of risk, the nature of regulation, and the challenge of regulating – in a broad sense – the increasing automation of motor vehicles. It then introduces four pairs of potential strategies to respond to this challenge, as summarized in Table 27.1 (above).

These strategies are not exhaustive. They may be unnecessary. And they may be insufficient. Some are obvious, some are unconventional, and some may well be both. Their purpose is to advance discussion of the proper role of the public sector – legislatures, administrative agencies, and courts – in addressing automation’s challenges and opportunities.

27.1.2 What Is Risk?

Risk can mean so many things that, without context, it means not much at all. Broadly, “[t]he risk of a particular harm is the product of the probability of that harm and the severity of that harm; the risk of an act or omission is the sum of the risks of the particular associated harms” [20]. This actual risk, however, is merely theoretical: No actor can comprehensively inventory all associated harms or accurately determine their probabilities and magnitudes.

In practice, actual risk is therefore simplified into assessed and perceived risk. Assessed risk reflects a methodical attempt to objectively describe all significant harms within a defined system; this system might contemplate a broad range of harms, as in the case of an environmental impact statement, or a more narrow range, as in the case of a functional

safety standard focused on physical injury to humans [20]. In contrast, perceived risk reflects an individual’s subjective judgment about particular dangers; it may differ considerably from the assessed risk.

An internalized risk is one that is borne by the actor who creates it, regardless of whether that actor has correctly assessed or perceived that risk. Internalization is central to tort law’s regulatory role: By forcing actors to bear more of the costs of their unreasonably dangerous behavior, tort law seeks to deter that behavior.

The financial risks imposed on these actors, however, are categorically different from the physical risks that these actors impose on others. In obligating these actors to pay damages to those they have injured, tort law also plays a compensatory role. Nonetheless, even if those who are injured succeed in recovering damages, they will still have been injured [20].

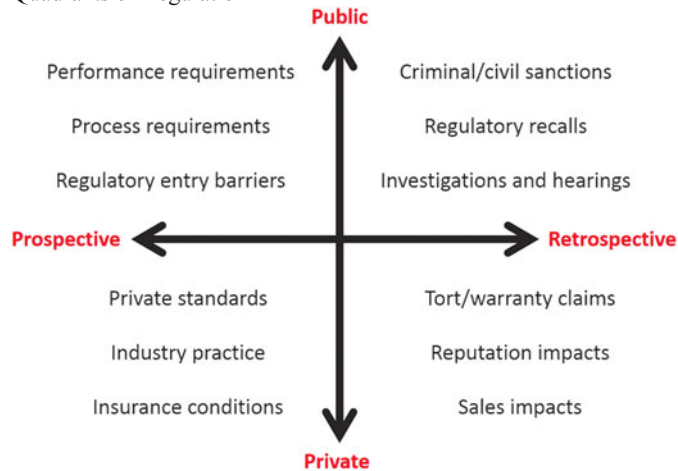
Accordingly, it is important to distinguish between reducing physical risk (a regulatory function) and shifting financial risk (a compensatory function). Some of the regulatory strategies introduced below may achieve one of these two objectives at the expense of the other.

27.1.3 What is Regulation?

Regulation checks and changes behavior. In its narrowest sense, the term refers only to rules enacted by an administrative agency. A more useful conception, however, encompasses a broad range of actions, including those illustrated in Figure 27.1 [24].

Regulation can be prospective (forward-looking) or retrospective (backward-looking). Prospective actions, shown on the left side, contemplate a generalized risk that has not manifested, as in the case of the federal performance requirements governing vehicle design. In

Figure 27.1 Quadrants of Regulation



contrast, retrospective actions, shown on the right side, respond to the realization of a risk, as in the case of a tort claim by a person injured in a crash. The possibility of retrospective regulation, particularly if it is foreseeable, can affect behavior even if the risk is never realized.

Regulation can also be pursued by a public actor or by a private actor. Public actions, shown on the top, include typical functions of the state: setting requirements and conducting investigations. In contrast, private actions, shown on the bottom, generally involve relationships among private parties: a consensus among market participants, a contract between an insurer and its insured, or the tort duties of a manufacturer to those who are injured by its products.

Although this chapter focuses on public actors, these private relationships remain an important tool of public policy. A statutory requirement that drivers obtain sufficient insurance, for example, delegates some regulatory power to the private-sector insurance companies that then decide, subject to additional public regulation, how much any particular driver should be charged.

27.1.4 The Regulatory Challenge

For public regulators, the utilitarian challenge is to indirectly maximize net social good while indirectly mitigating incidental individual loss. With respect to vehicle automation, this means defining an appropriate system in which societal costs and benefits can be analyzed [20], checking that the incentives and disincentives for developers of automated systems are consistent with that system, reconciling these with the incentives and disincentives for other actors, and ensuring that those who are harmed have appropriate access to some means of compensation.

This chapter outlines four pairs of potential regulatory strategies that could advance these goals. Its focus on risk management by public actors complements earlier risk management proposals for private actors [21]. These strategies involve ensuring compensation by expanding public insurance and facilitating private insurance, forcing information-sharing by privileging the concrete and delegating the safety case, simplifying the problem by limiting the duration of risk and excluding the extreme, and raising the playing field by rejecting the status quo and embracing enterprise liability.

27.2 Ensure Compensation

27.2.1 Expand Public Insurance

Insurance can help reduce the financial burden placed on injured individuals and, potentially, the compensatory pressure placed on tort law. Ensuring that those who are physically injured by automated vehicles are able to recover for their injuries makes the occurrence of those injuries, at least from a public policy perspective, more justifiable. If the only

avenue for that recovery, however, is litigation, product liability law may be forced to bend in ways that distort its regulatory function.

While an expansion of insurance has merit as a standalone initiative, it must be a condition of any reasonable proposal to subsidize vehicle automation by limiting tort remedies. Reducing a defendant's liability means reducing an injured individual's access to compensation. It also means depriving that individual of a sanctioned means of recourse: Suing a manufacturer, whatever its inefficiencies, is still preferable to sabotaging that company's products or undertaking other means of private retribution.

27.2.2 Facilitate Private Insurance

While private insurers can also provide compensation, their potential role as regulators is particularly promising. A well-functioning insurance market can generate useful data and desirable incentives. It can reduce uncertainty for those who might be plaintiffs as well as for those who are regularly defendants. Take two distinct examples: vehicle insurance and product liability insurance.

In the United States, most drivers and vehicle owners are required to carry insurance for harms inflicted with their vehicles. The required coverage varies by state and is generally far less than would be necessary to compensate for a serious injury or death; California, for example, requires only \$15,000 in coverage for injury or death to one person and \$30,000 in coverage for injury or death to more than one person [4]. The companies that offer this insurance tend to be subject to complex regulatory regimes that also vary by state; California even prescribes the primary factors to be used in pricing such insurance [5].

An alternative regime could respond much more flexibly to vehicle automation. Increasing and then enforcing insurance requirements could help internalize more crash costs, compensate injury more fully, shift some recovery from manufacturers toward negligent drivers, and enable consolidation of some product liability claims through subrogation. Reducing consumer-facing restrictions on insurers could free these companies to better tailor their products to reflect the actual risk posed by particular drivers in particular vehicles in particular conditions. This could in turn advantage those automated vehicles that actually represent a safety improvement.

In contrast to drivers, companies are generally not required by law to maintain product liability insurance. Indeed, one of the purposes of the corporate form is to protect shareholders from liability. Requiring such coverage, however, could provide a check on safety by engaging a third-party insurer in a regulatory role: In order to obtain affordable coverage – or coverage at all – a manufacturer would need to persuade the insurer that its products do not pose unreasonable risk. This would be another way to “delegate the safety case,” to quote the section of the same name below.

The regimes created by Nevada and California to regulate automated vehicles already require companies seeking to test their systems on public roads to demonstrate financial capacity beyond typical state insurance requirements. California, for example, requires

\$5,000,000 in the form of a certificate of insurance, a certificate of self-insurance, or a surety bond [3]. While this approach is promising, these heightened insurance requirements should apply to all vehicles rather than merely to automated vehicles undergoing testing. As the section of the same name argues below, such regulation should “raise the playing field” for conventional as well as automated vehicles.

27.3 Force Information-Sharing

27.3.1 Privilege the Concrete

Product development requires understanding, and as necessary shaping, external forces like law. If specific legal obligations, restrictions, or liabilities are impeding automated vehicle technologies, then would-be developers of those technologies should challenge those constraints. In short, they should identify the specific legal changes that they or their products require – and support these arguments with concrete data and careful analysis. If they do not, policymakers should ask why.

Although concerns have been raised for decades about the product liability implications of increasing vehicle automation [17], automakers tend to refer only broadly, if at all, to this potential challenge even as they announce plans to deploy increasingly advanced automation features. This apparent disconnect suggests either that the technologies themselves are not as imminent as popularly believed [22] or that the companies pursuing those technologies are not as concerned about general product liability as is commonly suggested.

In contrast, automakers have acted to address a more narrow liability question related to the installation or modification of automation systems. Several state legislatures have now clarified that, to quote Michigan law [12], manufacturers and subcomponent producers are “not liable and shall be dismissed from any action for alleged damages resulting from” such third-party installations or conversions “unless the defect from which the damages resulted was present” at the time of manufacture. This provision is largely a restatement of common law [22] and, like common law, does not unambiguously contemplate every potential modification claim.¹

Notwithstanding this uncertainty, this experience demonstrates that established automakers can recognize potential legal issues, propose specific legislative remedies, and – with the exception of California [34] – obtain their enactment. To the extent that automated vehicles depend on changes to vehicle codes [19], insurance requirements, or rules of liability, regulators should expect well-reasoned and well-supported arguments from their high-profile developers.

¹ Consider two examples. In the first, the manufacturer fails to warn against a foreseeable modification of its vehicle; might that failure to warn constitute a “defect from which the damages resulted”? In the second, the subcomponent producer designs a sensor that is highly vulnerable to hacking; might that security vulnerability constitute a “defect from which the damages resulted”?

Relying exclusively on companies to advance specific legal changes, however, can tend to preserve the status quo. Unlike conventional cars, low-speed shuttles and delivery robots generally have neither existing markets nor established companies to advocate for them. As a result, these applications of automation have been largely ignored in recent legislative and regulatory initiatives [22]. Accordingly, governments should also consider whether a dearth of specific proposals or concrete data can be explained by an inability rather than a disinclination to participate in the regulatory process.

In a sense, governments should approach policymaking with the same philosophy underlying public support of physical infrastructure and scientific research: Initiate what the private sector cannot or will not do. Broad mandates or basic conditions may be useful in driving or policing innovation, but attempts to closely tailor rules to products that do not yet exist could produce law that is premature and prejudicial.

27.3.2 Delegate the Safety Case

Vehicle automation is putting state regulators in a difficult position. Prominent examples come from Nevada and California, the two states whose departments of motor vehicles were directed to quickly enact regulations governing automated vehicles and automated driving.² These regulations seek both to provide greater legal certainty to the developers of automated systems [16], [26], [31] and to restrict unreasonably dangerous products and practices [23].

Many states, however, already empower regulators to restrict the registration, modification, or operation of road vehicles on the basis of safety [19]. A New York statute, for example, permits the motor vehicle commissioner to “refuse to register any vehicle or class of vehicles for use on the public highways where he determines that the characteristics of such vehicle or class of vehicles make such vehicle or vehicles unsafe for highway operation” [14].

Alternative approaches to deploying automation systems, including pilot projects and aftermarket modifications, may implicate this authority more quickly than would traditional rollouts [22]. Long before the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) promulgates rules for automated vehicles³ or even conducts investigations into incidents involving them, state regulators may be facing – or at least actively ignoring – the question of whether to revoke the registration of a vehicle retrofitted with a novel automation system.

Answering such a question will inevitably frustrate these regulators [31]. There is no consensus about how to define, or then how to demonstrate, the appropriate level of safety

² Other states have enacted automated driving statutes without expressly requiring this rulemaking.

³ NHTSA has historically promulgated performance standards only for safety technologies that have already been widely deployed, although the eventual regulation of vehicle-to-vehicle (V2V) communications systems is likely to be an exception.

for an automated vehicle or for the human-machine system to which it may belong [25]. Moreover, the kind of regulation that is appropriate for an established automaker may differ considerably from the kind that is appropriate for a small startup or an individual tinkerer [22].

Although state vehicle agencies generally lack NHTSA's technical resources, they may have more regulatory flexibility. Federal motor vehicle safety standards (FMVSSs) are restricted to objective measures and to tests "capable of producing identical results when test conditions are exactly duplicated" [7], quoted in [35].

In contrast, state agencies may be bound by less demanding requirements of administrative process, which may afford them the discretion needed to gradually develop consistent practice. This flexibility could enable state regulators to address specific technologies without entrenching rules that are likely to become anachronistic and irreconcilable with those of other states.

To this end, "delegating the safety case" would mean requiring the developer of a vehicle automation system to publicly make and defend arguments about how well its system should perform and how well its system actually performs. In short:

1. A manufacturer documents its actual and planned product design, testing, and monitoring.
2. The manufacturer publicly presents this documentation in the form of a safety case.
3. The regulatory agency and interested parties comment on this safety case.
4. The manufacturer publicly addresses these comments.
5. The agency determines that the manufacturer has presented a reasonable safety case.
6. The manufacturer certifies that its product adheres to its safety case.
7. The manufacturer sells that product.

This process draws on several existing models, including the type approval (or homologation) typical in the European Union and the self-certification prescribed by US law. It could accommodate the kind of process standards used in ISO 26262, the kind of alternatives discussion characteristic of environmental impact statements, and the kind of public dialogue foundational to notice-and-comment rulemaking.

By encouraging companies to disclose information necessary to their safety case, such an approach could help educate regulators and the broader public about the capabilities and limitations of these emerging technologies. Although disclosure could justifiably concern some developers, this process would not require the disclosure of all information, only that which is necessary to demonstrate a reasonable safety case. What is reasonable will likely evolve, and this approach could afford companies greater flexibility to make nontraditional arguments for the safety of their systems and regulators greater flexibility to adapt to changing capabilities.

Because flexibility can also mean uncertainty, early collaboration between regulators and developers may be necessary to avoid all-or-nothing approval decisions at the end of product development. Regardless, uncertainty is not a new concern: Whatever clarity that the current

federal regime offers through self-certification to specific standards is diminished by the recalls and lawsuits that can arise years or even decades after a vehicle has been sold.

Indeed, unlike current federal motor vehicle safety standards, a safety case could contemplate the entire product lifecycle. A developer might describe not only the steps it had taken to ensure reasonable safety at the time of sale but also the steps it would continue to take as it learned more about performance in the field.

27.4 Simplify the Problem

27.4.1 Limit the Duration of Risk

The potential longevity of any motor vehicle – the “average” age of cars in the United States is more than eleven years [15] – can create uncertainty for its manufacturers [21] and safety concerns for the public [26]. In 2013, Chrysler reluctantly recalled some Jeeps that were twenty years old [9], [13]. More generally, newer vehicles tend to be safer than older vehicles; “improvements made after the model year 2000 fleet prevented the crashes of 700,000 vehicles; prevented or mitigated the injuries of 1 million occupants; and saved 2,000 lives in the 2008 calendar year alone” [8].

This uncertainty may be particularly great in the case of automated vehicles [21]. Even extensive testing may not capture the full range of scenarios that these vehicles could face. Manufacturers may have difficulty predicting “the eventual response of judges, juries, regulators, consumers, and the public at large to incidents that will inevitably occur” [28]. Regulators may be “concerned that, first, isolated incidents involving these products will create feelings of helplessness and panic that unjustifiably stymie their wider adoption and that, second, these early products will still be around years later when they are much less safe than whatever has become state of the art” [26].

A promising response to these challenges is a lifecycle approach to vehicle design that seeks to limit the duration of risk. For the private sector, this could entail over-the-air updates, end-user license agreements, leasing arrangements, and a variety of other technical and legal tools to enable manufacturers to update or even forcibly retire systems in which they no longer have confidence [21]. For the public sector, this could mean requiring companies to document a strategy and a capacity for monitoring the long-term safety of their systems. Such documentation could be a key part of the safety case introduced above.

27.4.2 Exclude the Extreme

The aphorism that “the perfect is the enemy of the good” [33] is instructive for vehicle automation. Demanding perfection may impede the development or deployment of systems that, while not perfect, nonetheless represent a significant improvement over conventional vehicles. Excessive design demands, for example, might preclude an automated vehicle

that could avoid many of the common errors of human drivers but that could not avoid catastrophic multicar freeway pileups to the extent physically possible. In other words, it may be prudent to accept some failures in order to expedite larger successes.

Moreover, attempting to design an automated vehicle to handle every conceivable driving scenario may introduce complexity that is poorly understood, unmanageable, and ultimately detrimental to safety. Again, for example, designing an automated vehicle to rapidly accelerate through a pileup-in-progress might lead to programming oversights that could cause that same vehicle to errantly speed up after entering a closed construction zone. Here it may be prudent to accept some failures in order to prevent even more catastrophic failures.

For both of these reasons, early generations of automated vehicles may necessarily limit the technical challenges that they attempt to solve. These vehicles might be deployed into simplified environments at lower speeds [22]. Or they might continue to rely in part on human drivers [29], particularly if those humans are professionals who can be carefully trained, closely monitored, and sufficiently incentivized.

Sound engineering may demand additional limitations. For example, it may be prudent to program an automated vehicle to never speed, to always slow to a stop in the event of a detected failure, or to always permit human override within a set number of seconds. These stylized examples might mean that, in occasional cases, an automated vehicle will crash because it has failed to accelerate or because it has stopped or because its human driver has made poor decisions while panicking.

Although these should be primarily technical determinations, law may be able to play a supporting role. In some jurisdictions, for example, the plaintiff in a product liability case must demonstrate that an alternative product design was available and superior to the one alleged to have contributed to her injury. In such a case, it may be appropriate to give more weight to counterarguments about the complexity, uncertainty, and delay inherent in such designs.

There are, however, two important cautions. First, for those injuries that do occur, this strategy merely shifts more of the risk to those people who have been injured. This consequence highlights the need for a sufficient social safety net, whether provided through public insurance, private insurance, or another means. Second, codifying a ceiling on the performance required could mean calcifying the level of reasonable design for technologies that may quickly be capable of much more.

27.5 Raise the Playing Field

27.5.1 Reject the Status Quo

The reality that human drivers often violate rules of the road prompts speculation that programming automated vehicles to comply with these rules would reduce their appeal. Suggestions for addressing this perceived disadvantage have included expressly permitting

automated vehicles to travel at or above the prevailing traffic speed and delegating decisions about speed or aggression to the human users of these vehicles.

Drivers, however, currently behave in ways that are neither lawful nor reasonable [20]. They drive too fast for conditions, they follow other vehicles too closely, and they fail to yield the right of way to pedestrians. They drive while intoxicated or distracted. They fail to properly maintain their vehicles' tires, brakes, and lights. These largely unlawful behaviors occasionally result in crashes, and those crashes occasionally result in serious injury. This tragic status quo suggests that the current approach to traffic enforcement should be reformed rather than transferred to automated vehicles.

At this early stage in automation, transportation authorities would do better to optimize and then enforce rules of the road for all motor vehicles. Increasing the expectations placed on human drivers – by cracking down on speeding, texting, drunk driving, and other dangerous activities – could increase the appeal of automated vehicles at least as much as allowing those automated vehicles to speed.

Automated enforcement could be a key tool for increasing compliance. Such enforcement currently relies both on roadway devices (including speed and red light cameras) and on in-vehicle devices (including alcohol locks, speed regulators, and proprietary data recorders). Private entities such as fleet managers and insurance companies already provide some of this enforcement indirectly through private incentives. The potential proliferation of outward-facing cameras on vehicles and drones in the air might also facilitate increased public and private enforcement of rules of the road.

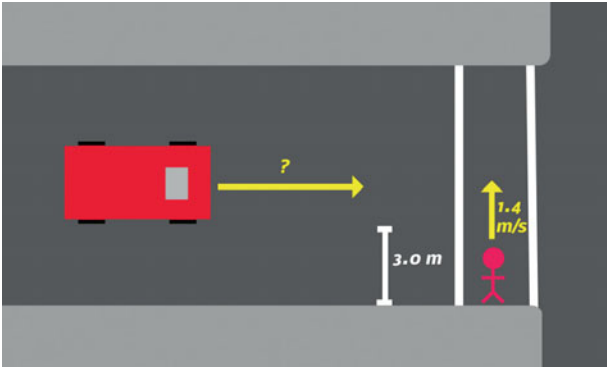
Increased enforcement could, on one hand, address equity concerns of discretionary enforcement and, on the other hand, raise privacy and liberty concerns. While these are important questions, a status quo in which laws are openly flouted even by the officers enforcing them is one that begs for reform.

Indeed, more consistent and comprehensive enforcement could create pressure for a careful evaluation of existing law. Better access to and analysis of location-specific information about the driving environment (including roadway geometry, pavement, traffic, and weather) could enable the precise calibration of dynamic speed limits. These dynamic limits might then be communicated to drivers through variable message signs and, in the future, vehicle-to-infrastructure communication.

Because reasonable speed also depends on the driver and her vehicle, posted limits might nonetheless have only limited utility. Pursuant to the basic speed law [20], a human driver should account for each of these variables implicitly and adjust her speed accordingly. Automated vehicles, however, may account for more of these variables explicitly – and reasonably.

Consider, for example, the common requirement that the “driver of a vehicle shall yield the right-of-way to a pedestrian crossing the roadway within any marked crosswalk or ... unmarked crosswalk at an intersection, except as otherwise provided” [6]. Although pedestrians may not create an “immediate hazard” by “suddenly” leaving the curb [6], the statutory obligation to yield does suggest one possible bound on vehicle speed.

Figure 27.2 Illustration of Vehicle Stopping



Imagine a driver traveling down a typical neighborhood street with a parking lane that provides 3 m between her car and the curb, as shown in Figure 27.2. Assuming that her view of the pedestrian is not blocked, what maximum speed will enable this driver to stop for any pedestrian who, at a walking speed of 1.4 m/s, steps from the curb into the street?

Although stopping sight distance depends on several vehicle, environment, and driver variables [1], this illustration simplifies these to consider only the driver’s reaction time and the friction between the tires and the road surface. An average driver with good tires on a flat dry street might achieve a reaction time of 1 s and a subsequent deceleration rate of 5 m/s², which implies a maximum speed of 20 km/h (13 mph).⁴ In contrast, a hypothetical automated vehicle reacting twice as fast and braking at 7 m/s² could reach a maximum speed of about 40 km/h (25 mph),⁵ which is a typical residential speed limit today. In other words, if automated vehicles are traveling slowly on a road, perhaps conventional vehicles should be traveling even more slowly.

Reasonable speed is also an answer to some, though not all, of the ethical dilemmas popularly raised in the context of automated driving [10], [32]. Positing a choice between killing one group of pedestrians and another, for example, fails to account for the possibility of negating the dilemma simply by driving more slowly. Slower speeds can increase controllability as well as reduce the magnitude of harm.

Speed is not the only relevant driver action. Tire condition, for example, is an important consideration in stopping distance, is at least nominally regulated [2], and yet varies widely within the current vehicle fleet. If the hardware on automated vehicles is expected to be regularly inspected, so too should the hardware on conventional vehicles. Moreover,

⁴ initial speed = rate of deceleration * ((pedestrian speed / orthogonal distance from curb to car) – reaction time) = (0.5 * 9.8 m/s²) * (((1.4 m/s)/3 m) – 1 s) = 6 m/s = 20 km/h = 13 mph.

⁵ initial speed = rate of deceleration * ((pedestrian speed / orthogonal distance from curb to car) – reaction time) = (0.7 * 9.8 m/s²) * (((1.4 m/s)/3 m) – 0.5 s) = 11 m/s = 41 km/h = 25 mph.

driving imposes environmental costs that are not internalized by vehicle owners and operators [18]. If automated driving proves to be more fuel efficient than human driving, a higher fuel tax would also incentivize automation.

In short, reform should seek to more closely align what is lawful with what is reasonable and to more closely align actual driver behavior with both [20]. The expectation that both automated vehicles and human drivers should behave reasonably is itself reasonable and ultimately advantageous to automated driving.

27.5.2 Embrace Enterprise Liability

Although vehicle automation will change the way some cases are litigated and resolved, manufacturers are likely to continue to successfully manage their product liability [28]. Uncertainty about liability is probably more of an impediment to product deployment than actual exposure to liability – and there are strategies that companies can take to manage that uncertainty [21].

This confidence, however, is not universal [11]. A more skeptical view even has precedent: The National Childhood Vaccine Injury Act of 1986 was passed in response to similar concerns that traditional product liability had rendered some vaccines uneconomic for their would-be producers. The regime it created “combines procedural and substantive limitations on conventional tort remedies with an alternative compensation scheme for probable victims of covered vaccines” [21].

If product liability exposure does impede the deployment of automated vehicles, a similar regime might be an effective response. However, that is by no means the only conceivable alternative.

Rather than limiting liability for the manufacturers of automated systems, courts or legislatures could expand liability for everyone else. This is counterintuitive and, as a legislative proposal, unlikely to go anywhere. Nonetheless, consider the consequences of introducing a system of enterprise liability in which manufacturers are liable for all harm associated with their products. In other words, what would be different if automakers could be successfully sued for every crash involving their product rather than just the small fraction in which a vehicle defect contributed to the injury?

Some effects would be undesirable. Automakers might outright refuse to sell their vehicles in any jurisdiction with enterprise liability. Others would demand higher prices to cover their increased costs. This could in turn mean less access for consumers, particularly those with limited resources.

Other effects, however, might arguably be more desirable. No longer would dealers simply hand over car keys to new buyers. Instead, manufacturers might require these buyers to complete more thorough driver training customized for the particular vehicle. Technologies like alcohol-sensing ignition locks and speed regulators might become standard. Older vehicles might be promptly removed from roads as safer systems are introduced. A notable result could be safer roads.

Another result could be greater automation: Given the choice between paying for the mistakes of their own technologies and paying for the mistakes of their disparate customers, many companies would likely opt for their technology. Automation would become a solution to rather than merely a source of litigation.

Even if pure enterprise liability remains a thought experiment, its principles are evident in other areas relevant to automation. Fleet operators are an attractive market for automated vehicles in part because they are already liable for injuries caused by the negligence of their drivers. Automation may also offer near-term financial or market advantages to insurers, which similarly pay for injuries caused by their insured.

More broadly, as manufacturers gain and assert more control over the products they have sold through technology and contract, they may also incur greater legal obligations in tort [21]. These obligations, which might approach enterprise liability without actually reaching it, could have a similar effect on design decisions. Eventually, selling a vehicle that lacks safety-critical automation features might itself be unreasonable.

27.6 Conclusion

This chapter began with two fundamental questions: How should risk be allocated in the face of significant uncertainty – and who should decide? Its focus on public actors reflects the significant role that legislatures, administrative agencies, and courts will play in answering these questions, whether through rules, investigations, verdicts, or other forms of public regulation.

The eight strategies discussed above would in effect regulate that regulation. They seek to ensure that those who are injured can be compensated, that any prospective rules develop in tandem with the technologies to which they would apply, that reasonable design choices receive sufficient legal support, and that conventional driving is subject to as much scrutiny as automated driving. Table 27.2 (below) summarizes.

Table 27.2 Potential Regulatory Strategies

Ensure sufficient compensation for those who are injured	
Expand public insurance	Facilitate private insurance
Force information-sharing by the private sector to enhance regulation	
Privilege the concrete	Delegate the safety case
Simplify both the technical and the regulatory challenges in coordination	
Limit the duration of risk	Exclude the extreme
Raise the playing field for conventional actors along with automated systems	
Reject the status quo	Embrace enterprise liability

This focus on public actors does not diminish the important roles that private actors play in innovation and in regulation. Indeed, several of the strategies discussed above expressly embrace these roles. In this spirit, a challenge for – and to – developers of automated systems is to contribute fully and publicly to the broader discussions for which these strategies are intended.

References

1. AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (Green Book), 6th Edition (2011)
2. Blythe, William and Seguin, Debra E., Commentary: Legal Minimum Tread Depth for Passenger Car Tires in the U.S.A. – A Survey, *Traffic Injury Prevention*, vol. 7, issue 2 (2006)
3. California DMV Regulations, Title 13, § 227
4. California Insurance Code § 11580.1b
5. California Proposition 103 (1988)
6. California Vehicle Code § 21950
7. *Chrysler Corp. v. Dept. of Transp.*, 472 F.2d 659, 676 (6th Cir. 1972)
8. Glassbrenner, Donna, An Analysis of Recent Improvements to Vehicle Safety, <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/811572.pdf>
9. Keane, Angela Greiling, Chrysler Refusal on Jeeps Sets Challenge to Recall Power, June 7, 2013, <http://www.bloomberg.com/news/2013-06-07/chrysler-refusal-on-jeeps-sets-challenge-to-recall-power.html>
10. Lin, Patrick, Why Ethics Matters for Autonomous Cars, in this book
11. Marchant, Gary E. and Lindor, Rachel A., The Coming Collision Between Autonomous Vehicles and the Liability System, *Santa Clara Law Review* (2012)
12. Michigan Compiled Laws Sec. 22949b
13. NHTSA Letter from Jennifer Timian, NHTSA, to Matthew Liddane, Chrysler Group LLC, June 21, 2013, <http://www-odi.nhtsa.dot.gov/acms/cs/jaxrs/download/doc/UCM440558/RCAK-13V252-1688.PDF>
14. N.Y. VEH. & TRAF. LAW § 400 (McKinney 2013)
15. Press Release, Polk, Polk Finds Average Age of Light Vehicle Continues to Rise (Aug. 6, 2013), https://www.polk.com/company/news/polk_finds_average_age_of_light_vehicles_continues_to_rise
16. Pritchard, Justin, How Google Got States to Legalize Driverless Cars, <http://bigstory.ap.org/article/how-google-got-states-legalize-driverless-cars> (2014)
17. Roberts, Stephen N., Hightower, Alison S., Thornton, Michael G., Cunningham, Linda N., and Terry, Richard G., Advanced Vehicle Control Systems: Potential Tort Liability for Developers, FHWA Contract DTFH61-93-C-00087 (Dec. 1, 1993)
18. Small, Kenneth A. and Kazimi, Camilla, On the Costs of Air Pollution from Motor Vehicles, *Journal of Transport Economics and Policy* (1995)
19. Smith, Bryant Walker (2014a), Automated Vehicles Are Probably Legal in the United States, 1 *Texas A&M Law Review* 411 (2014), <http://newlypossible.org>
20. Smith, Bryant Walker (2014b), Lawyers and Engineers Should Speak the Same Robotic Language, forthcoming in *Robot Law* (2014), <http://newlypossible.org>
21. Smith, Bryant Walker (2014c), Proximity-Driven Liability, 102 *Georgetown Law Journal* 1777 (2014), <http://newlypossible.org>

22. Smith, Bryant Walker (2014d), A Legal Perspective on Three Misconceptions in Vehicle Automation, in Sven Beiker and Gereon Meyer, *Vehicle Automation*, Springer Lecture Notes in Mobility (2014), <http://newlypossible.org>
23. Smith, Bryant Walker (2014e), Something Interesting in California's New Automated Vehicle Testing Rule, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2014/05/something-interesting-californias-new-automated-vehicle-testing-rule>
24. Smith, Bryant Walker (2013a), Taxonomy of Regulation (TRB), reprinted in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2014)
25. Smith, Bryant Walker (2013b), The Reasonable Self-Driving Car, <http://www.volokh.com/2013/10/03/reasonable-self-driving-car>
26. Smith, Bryant Walker (2013c), Automated Vehicles Are Probably Legal in the United States, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/04/automated-vehicles-are-probably-legal-united-states>
27. Smith, Bryant Walker (2013d), Planning for the Obsolescence of Technologies Not Yet Invented, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/10/planning-obsolescence-technologies-not-yet-invented>
28. Smith, Bryant Walker (2013e), Uncertain Liability, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/05/uncertain-liability>
29. Smith, Bryant Walker (2013f), SAE's Levels of Driving Automation, <http://cyberlaw.stanford.edu/loda>
30. Smith, Bryant Walker (2012a), Autolaw 3.0, TRB Workshop on Road Vehicle Automation (2012)
31. Smith, Bryant Walker (2012b), How an (Autonomous Driving) Bill Becomes Law, <http://cyberlaw.stanford.edu/events/how-autonomous-driving-bill-becomes-law>
32. Smith, Bryant Walker (2012c), Driving at Perfection, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2012/03/driving-perfection>
33. Voltaire, *La Bégueule*
34. Weiner, Gabriel and Smith, Bryant Walker, Automated Driving: Legislative and Regulatory Action, http://cyberlaw.stanford.edu/wiki/index.php/Automated_Driving:_Legislative_and_Regulatory_Action
35. Wood, Stephen P., Chang, Jesse, Healy, Thomas, and Wood, John, The Potential Regulatory Challenges of Increasingly Autonomous Motor Vehicles, 52 *Santa Clara Law Review* 1423 (2012)

Entwicklungs- und Freigabeprozess automatisierter Fahrzeuge: Berücksichtigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Risiken

28

Thomas Winkle

Inhaltsverzeichnis

28.1 Einleitung	612
28.1.1 Motivation	612
28.1.2 Fragen an die Produktsicherheit zunehmender Fahrzeugautomatisierung	612
28.1.3 Technische Weiterentwicklung von Assistenzsystemen – neue Möglichkeiten und Risiken	613
28.2 Erwartungen an die Sicherheit komplexer Fahrzeugtechnik	614
28.2.1 Gesteigerte Verbrauchererwartungen an die Fahrzeugsicherheit	614
28.2.2 Risiken und Nutzen automatisierter Fahrzeuge	615
28.3 Rechtliche Anforderungen und Auswirkungen	615
28.3.1 Allgemein anerkannte Regeln der Technik (aaRdT)	617
28.3.2 Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)	617
28.3.3 Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG)	618
28.4 Erhöhung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge auf der Basis von Expertenerfahrungen aus Haftungs- und Gewährleistungsansprüchen	619
28.4.1 Erfahrungen aus Produktkrisen	619
28.4.2 Wesentliche Fragen aus bisherigen Produkthaftungsfällen	621
28.4.3 Potenzielle Gefahrensituationen zu Beginn der Entwicklung	622
28.4.4 Methoden zur Risikobewertung während der Entwicklung	623
28.4.5 Prüfkriterien durch Expertenwissen	626
28.4.6 Schritte zur Erhöhung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge im allgemeinen Entwicklungsprozess	627
28.4.7 Produktbeobachtung nach der Markteinführung	629
28.4.8 Bewertung des Risikos möglicher Funktionsfehler nach der Markteinführung	629
28.5 Fazit und Ausblick	631
Literatur	633

T. Winkle (✉)

Technische Universität München – TUM, Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, Deutschland
winkle@carforensic.com

28.1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit von Sensortechnologie und Datenverarbeitung verbessert sich fortlaufend. Dadurch lassen sich eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen und die zunehmende Automatisierung von Fahraufgaben bis hin zu selbstfahrenden Fahrzeugen realisieren [1].

28.1.1 Motivation

Im Zuge dieser Entwicklung werden technische und elektronische Systeme um ein Vielfaches komplexer und stellen zukünftig Fahrzeughersteller und Entwickler vor neue Herausforderungen. Insbesondere ein Wechsel von der bislang durch Menschen gesteuerten hin zu einer hoch- bzw. vollautomatisierten Fahrzeugführung wirft grundsätzliche Fragen zur Verantwortung oder Haftung auf. Dies erfordert neue Ansätze – in erster Linie neue Sicherheits- und Testkonzepte [2]. Aus rechtlicher Sicht erfordern automatisierte Fahrzeuge zur Minimierung der Risiken sorgfältige Sicherungsmaßnahmen bei der Entwicklung [3]. Diese müssen Nutzer akzeptieren. Laut einem Urteil des Bundesgerichtshofs (BGH) müssen sie auch nach dem jeweils neuesten Stand der Wissenschaft und Technik – innerhalb der Grenzen des technisch Möglichen und wirtschaftlich Zumutbaren – konstruktiv möglich sein sowie geeignet und genügend erscheinen, um Schäden zu verhindern [4].

28.1.2 Fragen an die Produktsicherheit zunehmender Fahrzeugautomatisierung

Medienberichte über automatisierte Forschungsfahrzeuge von Automobilherstellern, Zulieferern und IT-Unternehmen weisen seit Jahren auf die Vorbereitung einer Serienentwicklung hin. Für eine Markteinführung fehlen jedoch noch mehrere Voraussetzungen. Eine zunehmende Automatisierung von Fahrfunktionen erfordert modernste, hochkomplexe Technologien. Insbesondere durch die Nutzung elektrischer/elektronischer Komponenten muss mit unvorhersehbaren Reaktionen gerechnet werden, die im Extremfall auch zu Schäden an Leib und Leben führen können. Aktuell zieht eine Vollautomatisierung der Fahraufgaben bei fahrerlosen Fahrzeugen (vgl. [3]) ohne einen verantwortlichen Fahrer als Rückfallebene aufgrund der zunehmenden Komplexität schwer überschaubare Risiken nach sich. Dazu kommen neue Haftungsfragen und eine begrenzte Toleranz bei technischen Ausfällen. Während in Deutschland zurzeit jährlich über 3000 Unfalltote im Straßenverkehr gesellschaftlich offenbar akzeptiert sind, fehlt womöglich jegliche Toleranz bei einem Unfalltoten, der im Zusammenhang mit vermeintlichen technischen Fehlern steht. Obwohl eine Automatisierung des Fahrens ein erhebliches Sicherheitspotenzial verspricht, wird eine übergreifende Vermarktung fahrerloser Fahrzeuge erst erfolgen, wenn eine Klärung der Haftungsfragen und der Verantwortung bei technisch verursachten Schäden

erfolgt ist. Gesellschaftliche Akzeptanz entsteht u. a. erst dann, wenn der wahrgenommene individuelle Nutzen die erlebten Risiken deutlich überwiegt.

Eine vertiefte Analyse der zu beachtenden Risiken automatisierter Fahrzeuge auf der Basis langjähriger Forschungs- und Produkthaftungserfahrungen liefert Grundlagen für die Vorbereitung ihrer zukünftigen Großserienentwicklung und Vermarktung. Daraus leiten sich Empfehlungen zur Sicherheitsbewertung ab. Bislang sind unter anderem folgende Fragen ungelöst:

- Welche Anforderungen sind für eine Entwicklung und Vermarktung sicherer automatisierter Fahrzeuge zu berücksichtigen?
- Wie sicher ist sicher genug?
- Unter welchen Bedingungen ist ein automatisiertes Fahrzeug fehlerhaft?
- Wie wird die Sorgfaltspflicht bei der Entwicklung sichergestellt?

28.1.3 Technische Weiterentwicklung von Assistenzsystemen – neue Möglichkeiten und Risiken

Aus technischer Sicht können automatisierte Fahrzeuge bereits heute Fahraufgaben im Verkehrsgeschehen selbstständig übernehmen. Aktuelle Serienfahrzeuge mit optimierter Sensor-, Computer- und Fahrwerkstechnik ermöglichen zunehmend leistungsfähigere Assistenzsysteme. Einige der heute angebotenen Fahrerassistenzsysteme warnen bei erkannten Gefahren im Längs- oder Querverkehr (z.B. Fahrstreifenverlassenswarnung, Kollisions-, Fahrstreifenwechsel, Nachtsicht- oder Kreuzungsassistent). Andere greifen in die Längs- oder Querdynamik ein (z.B. Antiblockiersystem – ABS, Electronic Stability Control – ESC, Adaptive Cruise Control – ACC). Park-Lenk-Assistenten ermöglichen erhöhten Komfort durch Lenk- und Bremsengriffe im Niedergeschwindigkeitsbereich. Diese teilautomatisierten Fahrzeugsysteme mit temporärer Längs- und Querführungsassistenten werden heute in Serienfahrzeugen ausschließlich unter Annahme der Kontrollierbarkeit eines aufmerksamen Fahrers angeboten. Die Überwachung durch den Fahrzeugführer ist erforderlich. Somit sind Systemeinschränkungen oder -ausfälle dieser Advanced Driver Assistance Systems – ADAS während des normalen Betriebs an den und außerhalb der Systemgrenzen über den Nachweis der Beherrschbarkeit durch den Fahrer abgedeckt (vgl.[5, 6]).

Beim vollautomatisierten Fahren hingegen steht der Fahrer nicht mehr als Rückfallebene für technische Systemeinschränkungen und Fehler zur Verfügung. Dieser Ersatz menschlich eigenverantwortlichen Handelns durch eine programmierte Maschine bringt technische und rechtliche Risiken sowie Herausforderungen an die Produktsicherheit mit sich. Jedoch lassen sich zukünftige Erwartungen an fahrerlose Fahrzeuge – auch in einer möglichen Umbruchsituation – nur anhand bisheriger Erfahrungen beschreiben. Deshalb werden im Folgenden Analogien auf der Grundlage vergangener und aktueller Erwartungen an die Fahrzeugsicherheit gezogen.

28.2 Erwartungen an die Sicherheit komplexer Fahrzeugtechnik

28.2.1 Gesteigerte Verbrauchererwartungen an die Fahrzeugsicherheit

Vollautomatisierte Fahrzeuge müssen am heute weltweit hohen Niveau des Verbraucherbewusstseins für Mängel an Kraftfahrzeugen gemessen werden. Seit dem Jahr 1965 entwickelte sich, verstärkt durch das Buch *Unsafe at Any Speed: The Designed-In Dangers of the American Automobile*, zunehmend ein kritisches Bewusstsein gegenüber der Automobilindustrie [7, 8]. In dieser Veröffentlichung wirft der Autor Ralph Nader den Fahrzeugherstellern Einsparungen bzw. Sorgfaltspflichtverletzungen zulasten einer sicheren Konstruktion und Herstellung vor. Die Darstellung von Sicherheits- bzw. Konstruktionsmängeln bei General Motors und anderen Herstellern schreckte die Öffentlichkeit auf. Im Nachgang gründete Nader das „Center for Study of Responsive Law“, das Kampagnen gegen die *Big Three* der US-Autobauer, den Volkswagen-Konzern und andere Automobilkonzerne startete. In der Folge wurden technische Konzepte überarbeitet und optimiert. Im Mittelpunkt von Naders Kritik stand der Chevrolet Corvair. Unter anderem kritisierte Nader die unsichere Fahrdynamik durch den Heckmotor sowie die Pendelachse. Diese veränderte beim Aus- bzw. Einfedern den Sturz der Räder (Neigung gegenüber der Senkrechten). Durch eine Konstruktionsänderung mit einer mehrfach gelagerten Achse bleibt dagegen die Neigung weitgehend gleich, was zu einem stabileren Fahrverhalten führt. Später stand aus ähnlichen Gründen der VW Käfer wegen seiner Seitenwindempfindlichkeit in der Kritik. Auch er war mit Heckmotor und Pendelachse ausgerüstet. Als technische Verbesserung löste der VW Golf mit Frontmotor und stabilerem Fahrverhalten (Markteinführung 1974) den VW Käfer ab.

Neben der Entwicklung neuer und fahrsicherer Fahrzeugkonstruktionen wurde als eine weitere Folge dieser Kritik im Jahr 1970 die US National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) gegründet. Angesiedelt innerhalb des Department of Transportation – auf der Grundlage des „Highway Safety Act of 1970“ – verbessert sie die Straßenverkehrssicherheit. Sie hat es sich zur Aufgabe gemacht, Menschenleben zu schützen, Verletzungen vorzubeugen und Fahrzeugunfälle zu reduzieren. Weiterhin bietet sie dem Verbraucher fahrzeugspezifische Sicherheitsinformationen, die vorher nicht allgemein zugänglich waren. Darüber hinaus begleitet die NHTSA bis heute zahlreiche Untersuchungen automobiler Sicherheitssysteme. Sie hat u. a. die verpflichtende Einführung eines automatisiert eingreifenden Fahrdynamikregelsystems (Electronic Stability Control – ESC) aktiv gefördert. Parallel zu den Aktivitäten der NHTSA zeigt auch die Statistik des Kraftfahrtbundesamtes einen zunehmend sensibleren Umgang mit sicherheitsrelevanten Mängeln durch die Begleitung oder Anordnung von Rückrufaktionen [9]. Mittlerweile bestehen höchste Erwartungen an die Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Das äußert sich in einer umfangreichen Sicherheitsausstattung, die heute fast weltweit in jedem Serienfahrzeug erwartet wird. Dazu gehören u. a. das Antiblockiersystem (ABS), Airbags oder eine Fahrdynamikregelung bzw. Electronic Stability Control. Die Häufigkeit von Rückrufaktionen hat zugenommen, obwohl die allgemeine Zuverlässigkeit und Funktionssicherheit

von Personenkraftwagen gleichzeitig deutlich gesteigert werden konnte. Dauertests in Fachzeitschriften wie *Auto Motor und Sport* zeigen: Eine Distanz von 100.000 Kilometern ist immer häufiger ohne Panne, außerplanmäßigen Werkstattaufenthalt, defektes Funktionsteil und ohne jeglichen geringfügigen Defekt zu bewältigen.

28.2.2 Risiken und Nutzen automatisierter Fahrzeuge

Automatisierte Fahrzeuge werden gesellschaftlich wohl nur dann akzeptiert, wenn der wahrgenommene *Nutzen* (abhängig vom *Wirkungsgrad*: *Driver* versus *Robot*) gegenüber den erwarteten *Risiken* (abhängig vom *Automatisierungsgrad*: *Wirkfeld* versus *Effektivfeld*) überwiegt. Zur Verringerung der Risiken führen Hersteller eine *Unfalldatenanalyse* und ein entsprechendes *Risikomanagement* durch (s. Abb. 28.1).

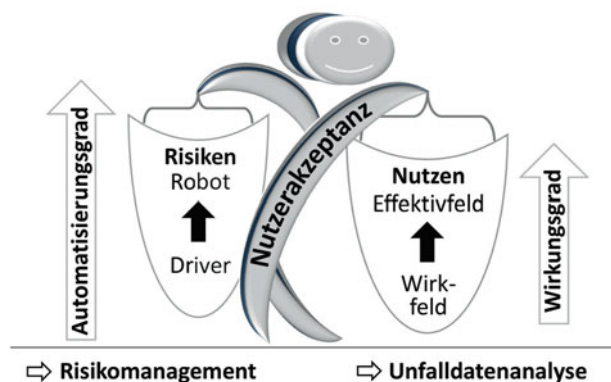
Für Automobilhersteller und Zulieferer sind automatisierte Fahrzeuge eine Produktinnovation mit Marktpotenzial. Bei Investitionsentscheidungen und Markteinführungen sind jedoch schwer kalkulierbare Risiken zu bewerten:

- Wird das Markenimage nachhaltig geschädigt, wenn das automatisierte Fahrzeug nicht den Verbrauchererwartungen entspricht?
- Welche Mängel können zu Rückrufaktionen führen?
- Welches Risiko von Produkthaftungsansprüchen besteht, wenn das automatisierte Fahrzeug nicht den Anforderungen eines sicheren Produkts entspricht?

28.3 Rechtliche Anforderungen und Auswirkungen

Die gesellschaftlichen und individuellen Erwartungen an die technische Perfektion von Fahrzeugen steigen. So verlangen zunehmende Anforderungen an Fahrzeugqualität und Funktion entsprechend hohe Sicherheitsmaßstäbe bei einer Einführung automatisierter Fahrzeuge. Dies zeigt sich beispielsweise durch die Zunahme von Rückrufaktionen trotz

Abb. 28.1 Gesellschaftliche und individuelle Nutzerakzeptanz stellt sich kontextbezogen ein, indem wahrgenommene Nutzungsoptionen mit Risikobefürchtungen gegeneinander abgewogen werden (s. Kap. 29, 30). Risiken hängen ab vom Automatisierungsgrad und der Nutzen vom Wirkungsgrad. Risikomanagement sowie Unfalldatenanalysen (s. Kap. 17) ermöglichen Optimierung und Objektivierung (s. Kap. 30)



steigender Fahrzeugzuverlässigkeit oder zusätzliche Vorgaben zur Durchführung übergreifender Sicherheitskampagnen (z.B. Motor Vehicle Safety Defects and Recalls Campaigns) oder neue Dokumentationspflichten seitens der Behörden. Ein Beispiel ist das Bundesgesetz „Transportation Recall Enhancement, Accountability and Documentation (TREAD) Act“ in den Vereinigten Staaten [10], das eine Reihe neuer und weitergehender Pflichten zur Aufbewahrung von Unterlagen und Meldungen an die Verkehrssicherheitsbehörde National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) einführte. Gleichzeitig werden menschliche Fehler im Straßenverkehr individuell sanktioniert, ohne dass das Verkehrssystem an sich infrage gestellt wird.

Hochkomplexe Technologien und abweichende Definitionen verlangsamten eine Einführung automatisierter Fahrzeuge. Hinzu kommen verschiedenartige technische Vorgaben im interdisziplinären Kontext. In der Vergangenheit konnten sich Entwickler nachvollziehbar an Vorgaben, wie den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“, der „Branchenüblichkeit“ oder dem „Stand der Technik“ orientieren. Der Bundesgerichtshof (BGH) wollte mit seiner Entscheidung vom 16.06.2009 die Anforderungen deutlich erhöhen und prägte für die Automobilindustrie überraschend den Begriff vom neuesten „Stand von Wissenschaft und Technik“. Dies stellt Entwickler vor zusätzliche Herausforderungen. Funktionen, die heute in Forschungsfahrzeugen zu wissenschaftlichen Zwecken unter Laborbedingungen möglich sind, erfüllen bei Weitem nicht die Erwartungen an ein Serienfahrzeug, wie beispielsweise Schutz vor Kälte, Hitze, Erschütterung, Wasser oder Schmutz.

Aus der Sicht eines Entwicklers werden diese rechtlichen Anforderungen an eine sorgfältige Entwicklung neuer komplexer Systeme erst nach definierten Absicherungstests erfüllbar. Diese sollten idealerweise international einheitlich abgestimmt sein. Das BGH-Urteil von 2009 begründet die Entwicklungsanforderung – vorbehaltlich der wirtschaftlichen und technischen Eignung zum Serieneinsatz – mit „... allen konstruktiv möglichen Sicherheitsvorkehrungen ...“ unter dem „Stand von Wissenschaft und Technik“ [4] auf der Basis eines Beweissicherungsgutachtens. Dieses fordert jedoch Ultraschallsensoren als Redundanz bei der Erkennung von relevanten Objekten zur Airbagauslösung. Es sei möglich, „... Ultraschallsensoren rund um das Fahrzeug anzubringen, die den Kontakt mit einem Gegenstand sensieren und die zusätzlich zu den bereits bestehenden Sensoren vor der Auslösung der Airbags abgefragt würden...“ [4].

Dieses Beweissicherungsgutachten ist jedoch aus technischer Sicht mehr als fragwürdig, denn aktuelle Sensorausführungen ermöglichen in Serienfahrzeugen nur eine Reichweite von wenigen Metern. Daher ist nach dem heutigen Stand der Technik eine Anwendung der Ultraschallsensorik auf die Erfassung statischer Umgebungen bei langsamer Fahrt im Bereich der Einparkassistenten beschränkt. Die hochfrequenten Schallwellen der Sensoren können durch andere Ultraschallquellen wie Druckluftbremsen von Lkw und Bussen oder Pressluftschlämmern gestört werden und zu Fehldetektionen führen. Ebenso erfolgt bei schlecht reflektierenden Oberflächen keine Reflektion. Damit bleibt eine Erkennung von Gegenständen gänzlich aus [11]. Außerdem stellte sich in dem Verfahren letztendlich heraus, dass das betroffene Sensorsystem entsprechend der technischen Spezifikation fehlerfrei gearbeitet hat.

Auch fordert das vorangehende Grundsatzurteil des BGH, Risiken und Nutzen vor einer Markteinführung zu prüfen:

Erforderlich sind die Sicherungsmaßnahmen, die nach dem im Zeitpunkt des Inverkehrbringens des Produkts vorhandenen neuesten Stand der Wissenschaft und Technik konstruktiv möglich sind ... und als geeignet und genügend erscheinen, um Schäden zu verhindern. [4] Sind bestimmte mit der Produktnutzung einhergehende Risiken nach dem maßgeblichen Stand von Wissenschaft und Technik nicht zu vermeiden, ist unter Abwägung der Risiken, der Wahrscheinlichkeit ihrer Verwirklichung und des mit dem Produkt verbundenen Nutzens zu prüfen, ob das gefährliche Produkt überhaupt in den Verkehr gebracht werden darf. [4]

28.3.1 Allgemein anerkannte Regeln der Technik (aaRdT)

Eine Auslegung des Rechtsbegriffs „allgemein anerkannte Regeln der Technik (aaRdT)“ als Grundlagenregel prägte ein Urteil des Reichsgerichts (RGSt 44, 86) von 1910 auf Basis einer Entscheidung aus dem Jahr 1891 in einem Strafverfahren zu § 330 StGB im Zusammenhang mit dem Baurecht:

Als allgemein anerkannte Regeln der Technik sind solche anzusprechen, die sich aus der Summe aller Erfahrungen im technischen Bereich ergeben, deren Bewährung in der Praxis feststeht und von deren Richtigkeit die Fachleute überzeugt sind.

In verschiedenen Rechtsbereichen haben sie unterschiedliche Bedeutungen. Bei den allgemein anerkannten Regeln der Technik handelt es sich bezogen auf die Produkthaftung um Mindestanforderungen, deren Nichteinhaltung dafür spricht, dass die erforderliche Sicherheit nicht erreicht wurde. Sie sind u. a. in DIN-VDE-Bestimmungen, DIN-Normen, Unfallverhütungsvorschriften und VDI-Richtlinien beschrieben [12].

28.3.2 Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)

Das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) in der Neufassung vom 08.11.2011 stellt Regeln zu Sicherheitsanforderungen und Verbraucherprodukten auf. Sein Vorläufer war das Geräte- und Produktsicherheitsgesetz vom 01.05.2004, das wiederum das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) vom 22.04.1997 und das Gerätesicherheitsgesetz (GSG) vom 24.06.1968 abgelöst hatte. Der § 3 beschreibt allgemeine Anforderungen an die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt:

Ein Produkt darf ... nur auf dem Markt bereitgestellt werden, wenn es bei bestimmungsgemäßer oder vorhersehbarer Verwendung die Sicherheit und Gesundheit von Personen nicht gefährdet. [13]

28.3.3 Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG)

Unabhängig von der rechtlichen Anspruchsgrundlage bezeichnet der Begriff „Produkthaftung“ die gesetzliche Haftung des Herstellers für Schäden aus einem fehlerhaften Produkt. Hersteller ist, wer ein Endprodukt, ein Teilprodukt, einen Grundstoff herstellt oder seinen Namen bzw. seine Marke am Produkt anbringt. In Deutschland bestehen für die Produkthaftung zwei unterschiedliche Anspruchsgrundlagen: Die verschuldensabhängige Haftung nach § 823 des Bürgerlichen Gesetzbuchs (BGB) [13] und zum anderen die verschuldensunabhängige Haftung nach dem Produkthaftungsgesetz. So beschreibt das Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG – Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte) vom 15.12.1989 die Konsequenzen eines Fehlers in § 1:

Wird durch den Fehler eines Produkts jemand getötet, sein Körper oder seine Gesundheit verletzt oder eine Sache beschädigt, so ist der Hersteller des Produkts verpflichtet, dem Geschädigten den daraus entstehenden Schaden zu ersetzen. [14]

Unabhängig davon, ob der Produktfehler vorsätzlich oder fahrlässig herbeigeführt wird, definiert das ProdHaftG einen Fehler gemäß § 3 Abs. 1 wie folgt:

Ein Produkt hat einen Fehler, wenn es nicht die Sicherheit bietet, die unter Berücksichtigung aller Umstände, insbesondere seiner Darbietung, des Gebrauchs, mit dem billigerweise gerechnet werden kann, sowie des Zeitpunkts, in dem es in den Verkehr gebracht wurde, berechtigterweise erwartet werden kann. [14]

Falls durch ein fehlerhaftes Produkt Schäden entstehen, regelt das Produkthaftungsgesetz die Haftung des Herstellers. Zunächst zieht dies mögliche Ansprüche aus der zivilrechtlichen Haftung für Sachschäden, Vermögensschäden, Personenschäden oder Schmerzensgeld nach sich. Haftpflichtig ist primär der Hersteller. In begründeten Fällen können auch Zulieferer, Importeure, Vertriebshändler oder Verkäufer unbegrenzt haftbar gemacht werden. Darüber hinaus können bei einer begründeten strafrechtlichen Haftung speziell auch Konsequenzen für die Unternehmensleitung oder einzelne Mitarbeiter entstehen, wenn nachweisbar versäumt wurde, Risiken auf ein akzeptiertes Maß zu reduzieren (S. 624, Abb. 28.3). Im Fall von grobem Verschulden bzw. je nach Delikt auch bei Fahrlässigkeit kann dies unter Umständen für einen Entwickler persönlich strafrechtliche Konsequenzen nach sich ziehen.

Neben den rechtlichen Folgen müssen Hersteller auch mit erheblichen negativen wirtschaftlichen Konsequenzen rechnen. Negative Schlagzeilen in den Medien können zu beträchtlichen Umsatz- bzw. Gewinneinbußen, Imageverlust und in der weiteren Folge zum Verlust von Marktanteilen führen. So sind bei der Entwicklung neuer Systeme die Risiken rechtlicher wie auch wirtschaftlicher Folgen zu bedenken. Abbildung 28.2 gibt einen Überblick über mögliche Auswirkungen von Fehlern automatisierter Fahrzeuge.



Abb. 28.2 Mögliche Auswirkungen bei Fehlern automatisierter Fahrzeuge

28.4 Erhöhung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge auf der Basis von Expertenerfahrungen aus Haftungs- und Gewährleistungsansprüchen

28.4.1 Erfahrungen aus Produktkrisen

Sichere automatisierte Fahrzeuge werden zukünftig weiterhin von integrierten Qualitätsmanagementsystemen [15, 16] und sicheren Interaktionen [17] abhängig sein. Oft waren in der Vergangenheit insbesondere fortschrittliche und erfolgreiche Fahrzeuge von Produktkrisen betroffen.

28.4.1.1 Fehlerhafte Zulieferteile

Folgende Beispiele dokumentieren, wie Teile eines Zulieferers Auslöser für weitreichende Produktkrisen geworden sind.

Der Ford Explorer galt als weltweit meistverkauftes Sport Utility Vehicle. Im Mai 2000 kontaktierte die NHTSA in den USA die beiden Konzerne Ford und Firestone wegen eines auffällig häufigen Auftretens von Reifenschäden durch die Ablösung von Laufflächen. Betroffen waren der Ford Explorer, Mercury Mountaineer und Mazda Navajo. Alle waren werkseitig mit Firestone-Reifen ausgestattet. Nach Reifenschäden kam es bei höheren Geschwindigkeiten zu Schleuderunfällen mit Überschlägen und tödlichem Ausgang. So standen Firestone-Reifen auf Ford-Explorer-Fahrzeugen im Zusammenhang mit über 200 tödlich verletzten Personen in den USA und mehr als 60 Toten in Venezuela. Im gerichtlichen Vergleich bezahlten Ford und Firestone 7,85 Millionen Dollar. Insgesamt betrugen die Schadenersatz- und Strafzahlungen 369 Millionen Dollar. Zum teuren Rückruf von mehreren Millionen Reifen wurden zusätzlich im Anschluss Fehler in der Krisenkommunikation begangen: Die verantwortlichen Manager schoben sich gegenseitig öffentlich die

Schuld zu. So zerbrach die über 100 Jahre alte freundschaftliche Geschäftsbeziehung der beiden Unternehmen. Bereits 1895 hatte Harvey Firestone Reifen an Henry Ford für die Produktion seines ersten Automobils verkauft. Im weiteren Verlauf der Krise kam es zu eklatanten Imageschäden mit Einbrüchen der Verkaufszahlen für beide Parteien [18].

Einen weiteren Beispielfall für mangelhafte Zulieferteile gab General Motors (GM) im Februar 2014 bekannt. Durch die Folgen der Wirtschaftskrise 2009 stand der Automobilkonzern kurz vor der Insolvenz und hatte nach einer staatlichen Rettungsaktion erstmals wieder Gewinne ausgewiesen sowie Preise für neue Modelle erhalten. Doch der Schalter des Zündschlosses einiger Modelle war scheinbar seit 2001 zu schwach ausgelegt, weshalb der Zündschlüssel während der Fahrt in die Position „Aus“ zurückspringen konnte. In diesem Fall schalten sich Motor, Bremskraftverstärker, Servolenkung und die Airbags ab. Die GM-Ingenieure waren mit dem Vorwurf konfrontiert, den Sicherheitsmangel trotz früher Warnzeichen mehr als zehn Jahre lang ignoriert zu haben. Der Konzern wurde deshalb bereits wegen eines verschleppten Rückrufs zu einer Geldstrafe von 35 Millionen Dollar verurteilt und sieht sich nach Massentrückrufen über Jahre mit milliardenschweren Schadenersatzklagen von Unfallopfern und Fahrzeugbesitzern konfrontiert [19].

28.4.1.2 Angeblich selbstbeschleunigende Fahrzeuge

Fahrzeuge mit automatisiertem Eingriff in die Längs- und Querverführung bergen erhebliche Risiken und eine Angriffsfläche für die Behauptung, es sei unerwünschtes Lenk- oder Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsverhalten aufgetreten. Mit dem Vorwurf der ungewollten Beschleunigung (*unintended acceleration*) durch angebliche technische Mängel standen in der Vergangenheit bereits einige Automobilhersteller im Kreuzfeuer der Medien. Vor allem in den USA hätten Fahrzeuge selbstständig beschleunigt und dadurch tödliche Unfälle verursacht. Betroffene Fahrer lösten deshalb Klagewellen aus, die seit Jahrzehnten andauern.

Ein Beispiel hierfür waren die Vorwürfe gegen Toyota, einem weltweit erfolgreichen und für Qualität bekannten Konzern. Toyota schnitt bei einer Kundenzufriedenheitsstudie des amerikanischen Marktforschungsunternehmens J.D. Power and Associates in den Jahren 2002, 2004 und 2005 sehr gut ab. Doch 2009 war Toyota mit Vorwürfen wegen angeblich selbstbeschleunigender Fahrzeuge konfrontiert. Auslöser waren zunächst einzelne Vorfälle von verrutschten Fußmatten, die für ein Verklemmen des Gaspedals verantwortlich gewesen sein sollen. Dann wurde behauptet, die Fahrzeuge hätten wegen mechanisch klemmender Gaspedale während der Fahrt unerwünscht beschleunigt. Da Toyota aus Sicht der NHTSA nicht ausreichend schnell auf die Vorwürfe reagiert hatte, warf man dem Unternehmen eine Verschleierung von Sicherheitsproblemen im Zusammenhang mit mehr als 50 Todesfällen in den USA vor. Neben den Zahlungen zum Schadensausgleich musste Toyota 2010 eine außergewöhnlich hohe Geldbuße von 16,4 Millionen Dollar an die Behörde bezahlen. Daraufhin folgten weitreichende Rückrufaktionen und Schadenersatzklagen [20].

Ein weiteres Beispiel für einen nachgewiesenen technischen Fehler, der zu unerwünschten Beschleunigungen führte, zeigt eine Rückrufaktion der NHTSA vom Juni 2014. Die Adaptive Cruise Control von Geländefahrzeugen der Firma Chrysler reduzierte die Geschwindigkeit nach einem vorübergehenden Übertreten nicht wieder auf die gesetzte Geschwindigkeit,

sondern beschleunigte unerwünscht weiter. Unfallopfer waren keine zu beklagen. Die kurzfristig eingeleitete Rückrufaktion beschränkte sich auf 6082 Fahrzeuge [21].

28.4.2 Wesentliche Fragen aus bisherigen Produkthaftungsfällen

Eigene Erfahrungen des Verfassers aus bisherigen Produkthaftungsfällen haben gezeigt, dass eine strukturierte Entwicklung als Mindestanforderung insbesondere auch für ein sicheres automatisiertes Fahrzeug vorausgesetzt wird (S. 627, Abschnitt 28.4.6). Im Schadensfall sind die im Folgenden genannten Fragen zur Abwehr zivil- und strafrechtlicher Ansprüche von Bedeutung:

- Wurde bereits vor Beginn einer neuen Produktentwicklung unter Abwägung der Risiken, der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Nutzens geprüft, ob das Fahrzeug mit dieser technischen Umsetzung überhaupt in den Verkehr gebracht werden darf?

Grundsätzlich existieren neben den allgemeinen gesetzlichen Anforderungen bis heute keine abgestimmten und harmonisierten Methoden für vollautomatisierte Fahrzeuge. Generieren lassen sich diese durch international anerkannte Entwicklungsleitfäden mit Checklisten – ähnlich dem mit der ISO 26262 [22] (Teil 3, Concept phase, Seite 24, Controllability) verlinkten RESPONSE 3-ADAS Code of Practice für die Entwicklung und Validierung von Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) mit aktiver Längs- und Querführung [5]:

- Welche Maßnahmen wurden zur Risiko-, Schadens- und Gefahrenminimierung über den gesetzlichen Rahmen hinaus ergriffen?

Zukünftige Vorgaben werden sich an den heute gültigen Anforderungen orientieren und diese zum größten Teil übernehmen. Die Methoden zur Bewertung des Risikos während der Entwicklung (S. 623, Abschnitt 28.4.4) gewährleisten, dass bei der Nutzung des Fahrzeugs keine intolerablen Personengefährdungen zu erwarten sind. Deshalb sind bei der Entwicklung mindestens die heute allgemein gültigen Anforderungen, Richtlinien, Verfahren und Prozesse zu berücksichtigen:

- Wurden beispielsweise allgemein anerkannte Regeln, Normen oder technische Vorschriften eingehalten?

Die Einhaltung gängiger Vorgaben allein ist im Allgemeinen nicht ausreichend. Vielmehr werfen sie folgende Fragen auf:

- Wurde mit der geforderten Sorgfalt entwickelt, produziert und vertrieben?
- Hätte der entstandene Schaden mit einer anderen Konstruktion vermieden oder in seiner Auswirkung gemindert werden können?
- Wie verhält sich bzw. wie hätte sich ein Fahrzeug aus dem Wettbewerb verhalten?
- Hätten Warnungen den Schaden verhindern können?

Ob ein automatisiertes Fahrzeug die erforderliche Sicherheit erreicht hat, zeigt sich am Ende des Entwicklungsprozesses:

- Wurde eine angemessene Sicherheit durch geeignete und genügende Maßnahmen nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bei Inverkehrbringen erreicht?

Auch nach einer erfolgreichen Markteinführung ist eine Beobachtung im Serieneinsatz zwingend erforderlich. Selbst dann, wenn alle rechtlichen Anforderungen, Richtlinien und Qualitätsprozesse für einen sicheren Gebrauch der entwickelten automatisierten Funktionen und für mögliche Fehlfunktionen eingehalten wurden. Die Beobachtungspflicht ergibt sich aus der Verkehrssicherungspflicht im Rahmen von § 823 Abs. 1 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) [13], deren Verletzung eine Haftung für einen Fehler auslöst, der solchermaßen hätte erkannt werden müssen. So stellt sich bei Produkthaftungsfällen auch die abschließende Frage:

- Wird bzw. wurde das automatisierte Fahrzeug im Kundenbetrieb beobachtet?

28.4.3 Potenzielle Gefahrensituationen zu Beginn der Entwicklung

Alltagserfahrungen unserer technologisch fortgeschrittenen Gesellschaft zeigen: Risiken und gefahrenträchtige Handlungen gehören zwangsläufig zum Leben. Unsicherheit und Unwägbarkeiten werden nicht mehr als schicksalhaft hinzunehmende Ereignisse betrachtet, sondern als mehr oder weniger kalkulierbare Unsicherheiten [23]. Daraus ergeben sich höhere Ansprüche an das Risikomanagement für die Hersteller neuer Technologien.

Eine strukturierte Analyse der Gefahren unter Berücksichtigung aller möglichen Umstände kann helfen, einen ersten Gesamtüberblick über die potenziellen Gefahren zu erhalten. Deshalb ist es im frühen Entwicklungsstadium sinnvoll, eine vollständige Beschreibung des automatisierten Fahrzeugs zu geben, um eine logische Gefahrenanalyse und eine anschließende Risikoklassifizierung zu gewährleisten (s. Abschnitt 28.4.4).

Auf dieser Basis ist es möglich, zum Projektstart in einem interdisziplinären Expertenteam (S. 627, Abb. 28.4) gemeinsam eine vollständige Liste der potenziell gefährlichen Situationen zu erstellen. Dies führt in der Regel zu vielen relevanten Situationen. Aufgrund praktischer Erwägungen sollten die Szenarien später für eine Expertenbewertung und Testung auf jene Situationen beschränkt werden, welche die höchste Relevanz besitzen (z. B. relevante Szenarien aus der Verknüpfung verfügbarer Verkehrsunfall-, Wetterdaten und Verkehrssimulationen, s. Kap. 17).

Nach der Systemdefinition ist es empfehlenswert, zunächst Situationen in einer Liste oder Tabelle zu sammeln. Diese berücksichtigt:

- wann die Funktion der Automatisierung verlässlich gewährleistet sein sollte (normale Funktion)

- in welchen Situationen die Automatisierung verwendet werden könnte, wofür sie jedoch nicht ausgelegt ist (Falschinterpretation und potenzieller Fehlgebrauch)
- wann Leistungsgrenzen für erforderliche Redundanzen erreicht sind
- ob gefährliche Situationen durch Fehlfunktionen der Automatisierung verursacht werden (Versagen)

Die gemeinsame Erarbeitung einer maximalen Anzahl an systemrelevanten Situationen macht es wahrscheinlich, dass keine relevante Gefahr ausgelassen oder vergessen wurde. Im nächsten Schritt empfiehlt sich eine Zusammenfassung von Gefahren mit direktem Einfluss auf die Sicherheit. Nach einer Reduktion auf tatsächliche sicherheitsrelevante Situationen werden hierfür technische Lösungen entwickelt.

28.4.4 Methoden zur Risikobewertung während der Entwicklung

In einer Veröffentlichung der Bundesregierung wird im Zusammenhang mit dem Ausstieg aus der Atomenergie erwähnt, dass die deutsche Gesellschaft als „Schicksalsgemeinschaft“ und als Teil der „Weltrisikogesellschaft“ den Fortschritt und Wohlstand bei gleichzeitig beherrschbaren Risiken wünscht [24]. Dies ist sicherlich nur eingeschränkt auf den Straßenverkehr übertragbar, denn die Risiken durch automatisierte Fahrzeuge beschränken sich – im Gegensatz zur Atomenergie – auf einen überschaubaren Personenkreis. Ähnlich sind jedoch spezifische Anforderungen an die verwendeten Methoden zur Analyse und Bewertung der Risiken. Im Folgenden werden fünf gängige Methoden vorgestellt.

28.4.4.1 Gefahrenanalyse und Risikobewertung

Der ADAS Code of Practice zur Entwicklung aktiver Längs- und Querführungsfunktionen [5, 6] sowie die ISO 26262 Teil 3 zur Funktionssicherheit [22] beschreiben das Vorgehen zur Gefahrenanalyse und Risikobewertung (G&R). Auch Teile der in den folgenden Abschnitten genannten Methoden (HAZOP, FMEA, FTA, HIL) verweisen auf die G&R. Ziel der G&R ist es, potenzielle Gefahren einer Betrachtungseinheit zu identifizieren, einzustufen und Ziele zu definieren. So lassen sich Gefahren vermeiden und die Risiken auf ein gesellschaftlich und individuell akzeptiertes Maß minimieren. Dazu wird eine „Betrachtungseinheit“ bezüglich ihres Einflusses auf die Sicherheit beurteilt und einem Automotive Safety Integrity Level (ASIL) zugeordnet. Eine „Betrachtungseinheit“ (Item) nach ISO 26262 ist definiert als komplexes elektrisches/elektronisches System oder als Funktion, die mechanische Komponenten verschiedener Technologien enthalten kann. Der ASIL wird bestimmt durch eine systematische Auswertung von möglicherweise gefährlichen Situationen und Betriebsbedingungen. Dabei erfolgt eine Bewertung der Unfallschwere [25] im Zusammenhang mit der Auftrittswahrscheinlichkeit. Eine Reduktion auf eine angenommene Hardwareausfall-Fehlerrate (z.B. ASIL D: $< 10^{-8} \text{ h}^{-1}$) für gesellschaftlich und individuell akzeptierte Risiken (S. 624, Abb. 28.3) erfolgt durch externe Maßnahmen [22].

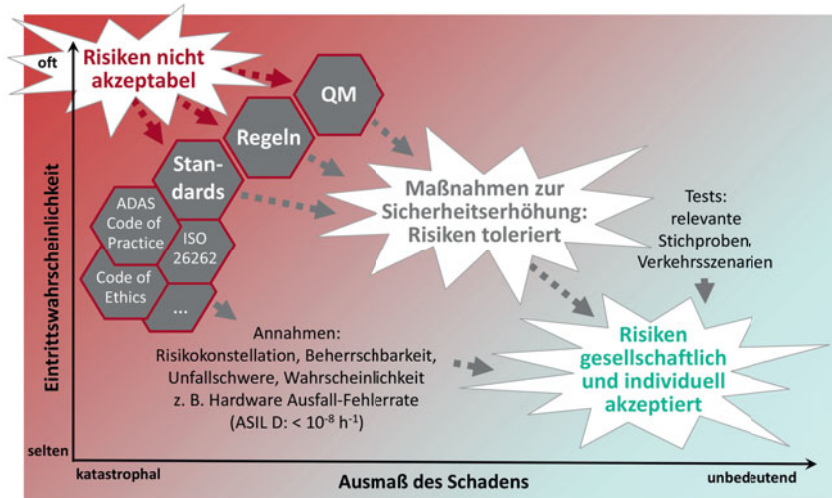


Abb. 28.3 Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit auf gesellschaftlich und individuell akzeptierte Risiken

Grundlegend kann das Risiko R für einen analytischen Ansatz ausgedrückt werden als Funktion F der Frequenz f , mit der ein gefahrbringendes Ereignis auftritt, und der potenziellen Schadensschwere S des sich daraus ergebenden Schadens:

$$R = F(f, S) \quad (28.1)$$

Die Frequenz f , mit der ein gefahrbringendes Ereignis auftritt, wird wiederum von verschiedenen Parametern beeinflusst. Ein wesentlicher zu berücksichtigender Faktor ist, wie häufig oder wie lange sich eine Person in einer Situation aufhält, in der eine Gefahr auftreten kann (E = exposure). Ein anderer Faktor, der das Auftreten eines gefahrbringenden Ereignisses beeinflusst, ist die Vermeidung einer potenziellen Schadensauswirkung durch rechtzeitige Reaktionen der am Unfallgeschehen beteiligten Personen bzw. Verkehrsteilnehmer (C = controllability). Eine Beherrschbarkeit durch den Fahrer entfällt jedoch in Bezug auf das unfallbeteiligte fahrerlose bzw. vollautomatisierte Fahrzeug. Das Produkt $E \times C$ ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass in einer gewissen Situation ein Fehler das Potenzial hat, sich entsprechend dem beschriebenen Schaden auszuwirken.

Ein weiterer Faktor (λ = Fehlerrate) lässt sich zurückführen auf unentdeckte zufällige Hardwareausfälle der Systemkomponenten und auf gefährliche systematische Fehler, die im System verblieben sind. Er stellt die Häufigkeit des Auftretens bezogen auf E dar, mit der das automatisierte Fahrzeug selbst ein gefahrbringendes Ereignis auslösen kann. Somit beschreibt das Produkt f die Anzahl der Ereignisse, die während der Zeit E (z. B. gefahrene Kilometer oder Anzahl der Fahrzeugstarts) zu erwarten sind.

$$f = E \times \lambda \quad (28.2)$$

Weiterhin berücksichtigt die ISO 26262 Ausfallraten technischer und elektronischer Bauteile (Failure in Time – FIT). Die Einheit FIT gibt die Anzahl der Bauteile an, die innerhalb von 10^9 Stunden ausfallen. Im Ergebnis aus Auftretswahrscheinlichkeit f und – falls möglich – Beherrschbarkeit bzw. Kontrollierbarkeit C erfolgt eine Einstufung der „Sicherheitskritikalität“ nach ASIL B, C (empfohlene Ausfallwahrscheinlichkeit kleiner 10^{-7} je Stunde; dies entspricht einer Rate von 100 FIT) bis ASIL D (geforderte Ausfallwahrscheinlichkeit kleiner 10^{-8} je Stunde; dies entspricht einer Rate von 10 FIT). Die höchsten Anforderungen entsprechen dem ASIL D. Zusätzlich berücksichtigt die ISO 26262 neben dem normalen Betrieb des Fahrzeugs auch Serviceanforderungen bis hin zur Stilllegung des Fahrzeugs. In diesem Zusammenhang müssen Entwickler bei der Auswahl von Bauelementen Alterungsfolgen elektronischer Systeme in Betracht ziehen. Steuergeräte oder Sensoren sind durch eine robuste Auslegung entsprechend zu schützen, falls sie mit alterungsempfindlichen Elektrolytkondensatoren zur Energiereserve bestückt wurden. Ein Ausfall darf keine wichtigen Funktionen außer Kraft setzen [22].

28.4.4.2 Gefahren- und Operabilitätsstudie (HAZOP)

Die Gefahren- und Operabilitätsstudie (Hazard and Operability Study – HAZOP) ist eine frühe Risikobewertung, die in der Prozessindustrie entwickelt wurde. Eine HAZOP sucht nach jeder vorstellbaren Prozessabweichung vom normalen Betrieb und betrachtet dann mögliche Ursachen und Konsequenzen. Typischerweise führt ein Spezialistenteam aus den betroffenen Entwicklungsbereichen die Suche bei der HAZOP systematisch durch, um so die Wahrscheinlichkeit zu minimieren, dass wichtige Faktoren übersehen werden [5].

28.4.4.3 Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA)

Die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (Failure Mode and Effects Analysis – FMEA) sowie die integrierte Fehler-Möglichkeiten-, Einfluss- und Kritikalitätsanalyse (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA) sind Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse, die Fehler mit signifikanten Konsequenzen identifizieren, welche die Systemleistung in der betrachteten Anwendung betreffen. Die FMEA basiert auf einem definierten System, einer Baugruppe oder einem Bauteil, für das die grundlegenden Fehlerkriterien (Primärfehlermodi) verfügbar sind. Sie ist eine Technik zur Absicherung und Einschätzung möglicher Fehlerzustände bei der Auslegungsüberprüfung. Sie kann vom ersten Schritt der Systemauslegung bis zum fertigen Produkt angewendet werden. Die FMEA lässt sich auf die Auslegung aller Systemebenen anwenden [26, 27].

28.4.4.4 Fehlerbaumanalyse (FTA)

Die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis – FTA) beschäftigt sich mit der Identifikation sowie Analyse von Bedingungen und Faktoren, die das Auftreten eines definierten Fehlerzustands begünstigen, der die Systemleistung, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit oder andere erforderliche Eigenschaften beträchtlich beeinflusst. Der Fehlerbaum ist besonders geeignet für die Analyse komplexer Systeme, die mehrere funktionell zusammenhängende oder unabhängige Untersysteme mit verschiedenen Leistungszielen umfassen. Dies trifft insbe-

sondere auf Systemauslegungen zu, die eine Zusammenarbeit zwischen vielen spezialisierten technischen Designgruppen erfordern. Beispiele von Systemen, bei denen die Fehlerbaumanalyse verbreitet angewendet wird, sind Kernkraftwerke, Flugzeuge, Kommunikationssysteme, chemische und andere industrielle Prozesse. Der Fehlerbaum selbst ist eine organisierte grafische Darstellung der Bedingungen oder anderer Faktoren, die das Eintreten eines definierten unerwünschten Vorfalls, den man auch *Top Event* nennt, verursachen oder dazu beitragen [5].

28.4.4.5 Hardware-in-the-Loop (HIL)-Tests

Eine zunehmende Fahrzeugvernetzung stellt besondere Anforderungen an die Absicherung des gesamten Steuergeräteverbunds, z. B. von Bordnetzicherheit, Buskommunikation, Fahrzeugzustandsmanagement, Diagnose und Flashverhalten. Hardware-in-the-Loop (HIL)-Tests lassen sich anwenden, sobald ein Hardware-Prototyp des Systems oder auch ein Teil davon (z. B. eine elektronische Steuereinheit eines Fahrzeugs) verfügbar ist. In einer software-simulierten, virtuellen Umgebung wird der Prototyp als Device Under Test (DUT) in einen „Loop“ (Kreislauf) eingefügt. Diese soll der echten Umgebung so ähnlich wie möglich sein. Der DUT wird unter Echtzeitbedingungen betrieben [28].

28.4.5 Prüfkriterien durch Expertenwissen

Im Freigabeprozess ist eine Vorgehensweise zur Überprüfung vorzusehen. Für den Endnachweis einer Sicherheitsbestätigung automatisierter Fahrzeuge sind Prüfkriterien im Sinne von „bestanden“ bzw. „nicht bestanden“ zu empfehlen. Unabhängig davon, welche Methoden für den abschließenden Freigabenachweis ausgewählt wurden, sollten sich die Experten darauf einigen, welche Prüfkriterien ausreichend sind, damit das Fahrzeug bestimmte Situationen eines Systemversagens oder Fehlfunktionen erfolgreich bewältigt. Für entsprechende Kriterien sind allgemein anerkannte Werte zum Erreichen der gewünschten Fahrzeugreaktion heranzuziehen. Eine Evaluation kann durch etablierte Methoden erfolgen.

Auf Basis der Liste potenzieller Gefahrensituationen (S. 622, Abschnitt 28.4.3) entwickelt ein Expertengremium die Prüfkriterien für sicheres Fahrzeugverhalten und eventuell auch relevante Testszenarien. Dafür ist insbesondere ein Team von Systemingenieuren und Unfallforschern erforderlich. Die erste Gruppe bietet Wissen über die genauen Systemfunktionalitäten, Zeitabläufe und Erfahrungen mit Fehlermöglichkeiten. Unfallforscher tragen ihr Erfahrungswissen über risikobehaftete Verkehrssituationen bei (s. Kap. 17). Jede bekannte risikobehaftete Situation, in die das Fahrzeug geraten könnte, ist zu berücksichtigen. Zu den identifizierten Risiken spezifiziert der Entwickler mindestens eine mögliche Abhilfemaßnahme im Hinblick auf die Sicherheitsanforderungen. Bezogen auf den abschließenden Nachweis gilt das Testszenario als „bestanden“, wenn das automatische Fahrzeug wie erwartet reagiert oder die Situation anderweitig zufriedenstellend löst.

28.4.6 Schritte zur Erhöhung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge im allgemeinen Entwicklungsprozess

Für die Gewährleistung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge ist ein sorgfältiges Entwicklungskonzept notwendig, welches sich mindestens am aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik orientiert. Hierfür wird nachfolgend ein allgemeiner Entwicklungsprozess vorgeschlagen, wie ihn heute vom Grundsatz her mit kleinen Anpassungen die Automobilhersteller für die Entwicklung von Serienfahrzeugen anwenden. Dieser als V-Modell dargestellte generische Entwicklungsprozess (s. Abb. 28.4) bildet eine logische Abfolge der Phasen einer Produktentwicklung und ausgewählte Meilensteine, jedoch nicht zwingend deren Zeitablauf ab [5, 29].

Der Prozess ist eine vereinfachte Darstellung in Form eines V-Modells, das Iterations-schleifen innerhalb der individuellen Entwicklungsphasen gemeinsam mit allen Beteiligten ermöglicht. Innerhalb dieser V-förmigen Prozessstrukturierung (s. Abb. 28.4) sind Elemente des Sicherheitsprozesses berücksichtigt. Auch empfiehlt sich frühzeitig und regelmäßig interdisziplinäre Expertengruppen zu berücksichtigen. Von der Definitionsphase bis zur Absicherung, Abnahme und dem Produktionsstart sollten Experten aus Forschung, (Vor-) Entwicklung, Funktionssicherheit, Produktanalyse, Rechtswesen, Verkehrssicherheit, Technikethik, Ergonomie, Produktion und Vertrieb einbezogen werden.

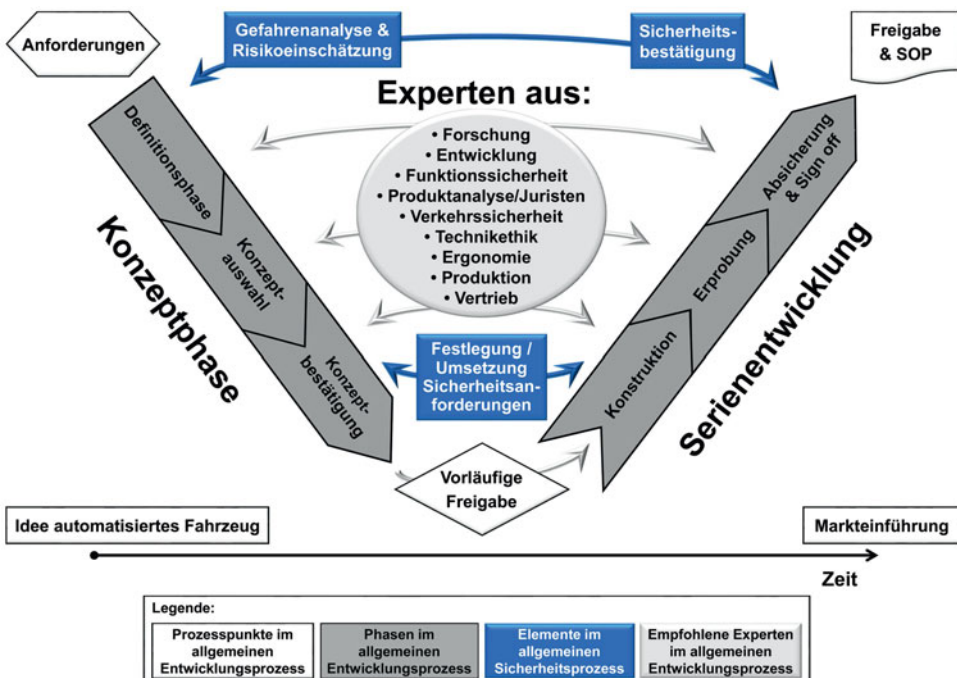


Abb. 28.4 Allgemeiner Entwicklungsprozess für automatisierte Fahrzeuge von der Idee bis zur Markteinführung unter Einbeziehung empfohlener Experten

Bei den Entwicklungsschritten zur Erhöhung der Produktsicherheit automatischer Fahrzeuge steht die Funktionssicherheit als Schlüsselanforderung im Vordergrund. Sie bezieht sich auf die gesamte Interaktion zwischen dem Fahrzeug und der Umgebung. Eine Interaktion mit dem Fahrer [30] ist dann zu berücksichtigen, wenn hierfür entsprechend dem Anwendungsfall bzw. der Funktionalität eine Schnittstelle vorgesehen ist. Vollautomatische Fahrzeuge schließen im Wesentlichen die fünf folgenden Nutzungssituationen für die Betrachtung der Produktsicherheit ein. Im Vordergrund steht die funktionale Sicherheit des vollautomatischen Fahrzeugs – innerhalb sowie an den Leistungsgrenzen und auch jenseits davon. Weiterhin ist die Funktionssicherheit während und nach Systemausfällen zu betrachten. Eine sorgfältige Entwicklung anwendungssicherer fahrerloser Fahrzeuge muss sicherstellen, dass diese die Kritikalität einer Situation erkennen, über geeignete Maßnahmen zur Gefahrenabwehr (z.B. Degradation, Fahrmanöver) mit einer Rückführung in einen sicheren Zustand entscheiden und diese Maßnahmen schließlich durchführen.

Einen Überblick über einen möglichen Arbeitsfluss im Hinblick auf die Freigabe bis hin zur Stilllegung gibt Abb. 28.5. Am Ende der Entwicklung eines automatisierten Fahrzeugs entscheidet das Entwicklungsteam, ob noch ein abschließender Bestätigungstest erforderlich ist. Dieser bestätigt, dass der Serienstand eine ausreichende Sicherheit erreicht. Hierzu verifiziert das Entwicklungsteam, dass ein Fahrzeug in relevanten Szenarien so wie vorher eingeschätzt oder in einer anderen situativ angemessenen Weise reagiert. Die hierfür verwendeten Daten können aus Methoden zur Bewertung des Risikos während

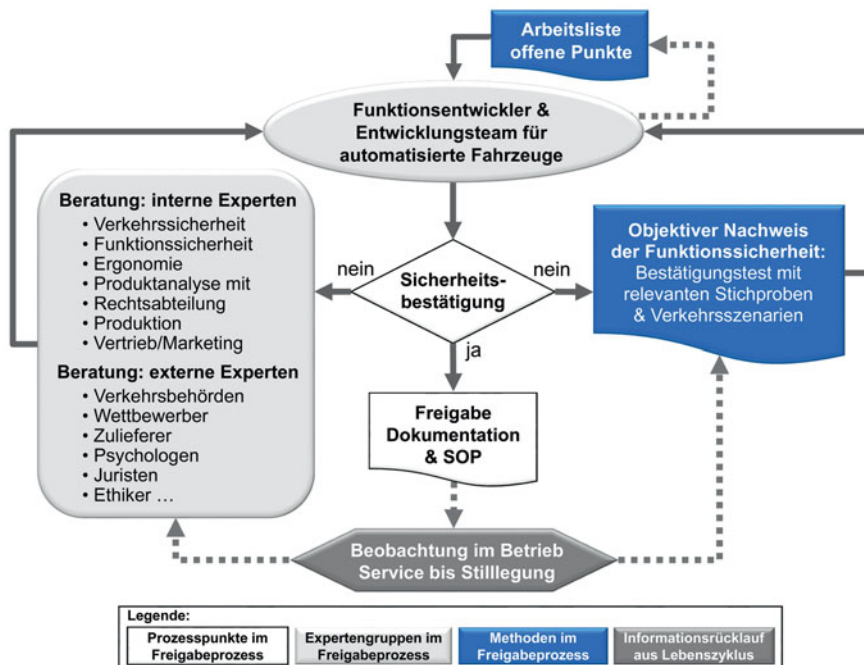


Abb. 28.5 Empfohlener Freigabeprozess für automatisierte Fahrzeuge

der Entwicklung stammen (z.B. Gefahren- und Risikoanalyse). Drei gleichwertige Freigabewege sind möglich. Eine direkte Freigabe erfolgt durch die erfahrungsbasierte Empfehlung des Entwicklungsteams. Weiterhin kann eine abschließende Sicherheitsbestätigung nach entsprechender Rückversicherung über ein internes bzw. externes interdisziplinäres Expertenforum oder einen objektiven Nachweis verabschiedet werden. Die Bestätigung der Funktionssicherheit ist mittels Bestätigungstests basierend auf relevanten Verkehrsszenarien (s. Kap. 17) und anderen objektiven Stichproben möglich (s. Abb. 28.5).

Das Entwicklungsteam wählt für jedes einzelne Szenario einen geeigneten Weg aus. Ein gemischter Ansatz ist ebenfalls möglich. Wenn das Entwicklungsteam die Sicherheitsbestätigung der Systemauslegung abschließend veranlasst, kann die endgültige Freigabe erteilt werden (vgl. [5]).

28.4.7 Produktbeobachtung nach der Markteinführung

Im Anschluss an eine sorgfältige Entwicklung ist ein Hersteller verpflichtet, ein automatisiertes Fahrzeug nach dem sogenannten Inverkehrbringen zu beobachten, um bislang unbekannte Gefahren zu erkennen und nachträglich geeignete Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen. Danach ist ein Automobilhersteller angehalten, mögliche Gefahren zu erkennen (die auch bei nicht bestimmungsgemäßer oder missbräuchlicher Verwendung auftreten können), um mit entsprechenden Maßnahmen wie beispielsweise Rückrufaktionen, Nachbesserung oder Benutzerinformationen zu reagieren.

Als spezielles Beispiel zur Produktbeobachtungspflicht bei Kombinationsrisiken mit Drittzubehör wird unter Produkthaftungsexperten oft ein Urteil des Bundesgerichtshofs (BGH) zitiert. Modellspezifische Motorrad-Lenkerverkleidungen aus dem Zubehör, die amtlich anerkannte Sachverständige einer Prüforganisation im Juni 1977 erstmalig abgenommen hatten, sollen für drei spektakuläre Unfälle verantwortlich gewesen sein, darunter ein tödlicher. Der betroffene Motorradhersteller schrieb am Tag vor dem tödlichen Unfall jeden ihm bekannten Fahrer des betroffenen Modells mit einer Warnung persönlich an. Den Verunglückten erreichte dieses Schreiben indes nicht mehr. Obwohl der Motorradhersteller vor der Verwendung der Verkleidung ausdrücklich warnte, wurde das Unternehmen zu Schadensersatz verurteilt. Der BGH fällte in dieser Sache ein wegweisendes Grundsatzurteil:

Die Firmen müssen künftig nicht nur die Verlässlichkeit ihres Produkts in der Praxis beobachten, sondern vor allem ihre Kunden auf Gefahren im Tagesbetrieb hinweisen – auch auf solche, die durch Verwendung oder Einbau von Zubehör anderer Hersteller entstehen. [31]

28.4.8 Bewertung des Risikos möglicher Funktionsfehler nach der Markteinführung

Aufgrund von Vernetzung und Komplexität werden sämtliche Risiken automatisierter Fahrzeuge im Serienbetrieb nur schwer zu überblicken sein. Die zunehmende Sensibilität

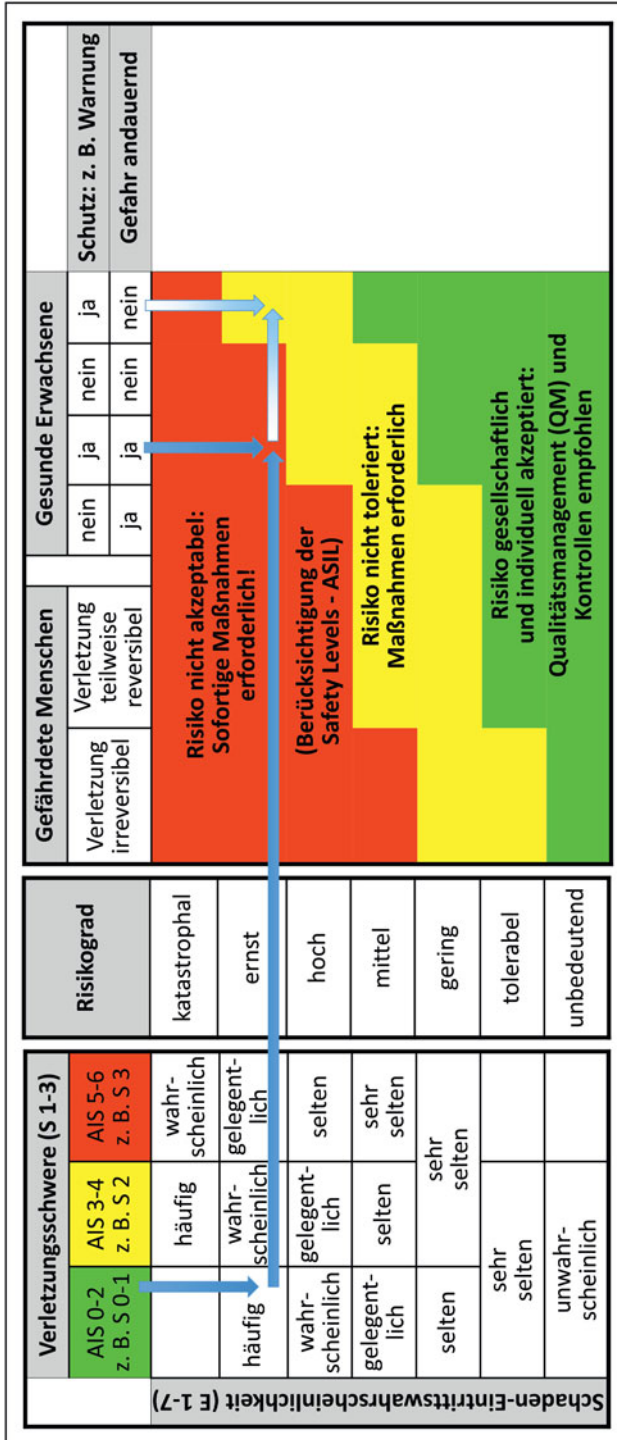


Abb. 28.6 Risikobeurteilung und Ableitung erforderlicher Maßnahmen in Anlehnung an RAPEX, ALARP und ISO 26262. Quellen: RAPEX, ADAS Code of Practice, ISO 26262, ALARP

für Mängel zeigt die deutliche Zunahme weltweiter Rückrufaktionen. Tauchen im Serienbetrieb bislang unbekannte Fehler auf, sind für diese gegebenenfalls nach einer Risikobewertung entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

Zur Risikoanalyse und Risikobeurteilung von Produktfehlern nach der Markteinführung – im Hinblick auf die Notwendigkeit bzw. Dringlichkeit von Rückrufaktionen – nutzen die EU und das deutsche Kraftfahrtbundesamt Tabellen des Schnellwarnsystems RAPEX (Rapid Exchange of Information System) [32]. Die Risikoeinstufung erfolgt zunächst über die *Verletzungsschwere* (Schadensausmaß S beispielsweise nach AIS) und die *Eintrittswahrscheinlichkeit* eines Schadens – ähnlich dem ALARP-Prinzip (As Low As Reasonable Possible) [33], dem ISO 26262-Standard [22] und dem Code of Practice für ADAS mit aktiver Längs- und Querverführung [5, 6]. Daraus wird der *Risikograd* abgeleitet. Die abschließende Beurteilung der Dringlichkeit von erforderlichen Maßnahmen berücksichtigt ein Verletzungsrisiko der verletzungsgefährdeten Menschen (Einfluss von Alter, körperlicher Gesundheitszustand usw.) bzw. die Gefahr für einen mental gesunden Erwachsenen (Reaktionsfähigkeit, Risikobewusstsein usw.) und die Nutzung von Schutzmaßnahmen wie angemessene Warnhinweise (s. Abb. 28.6).

28.5 Fazit und Ausblick

Einerseits sind Erwartungen in der Gesellschaft verständlich, die zunehmend höchste Sicherheitsansprüche an neue Technologien nach „Stand der Wissenschaft und Technik“ fordern. Andererseits verhindert ein unrealistischer Anspruch an die technische Perfektion bzw. das Streben nach 100-prozentiger Fehlerfreiheit gegebenenfalls eine Markteinführung automatisierter Fahrzeuge und damit die Chance auf ein revolutionäres Nutzenpotenzial. Dadurch bleiben Innovationen aus.

Manche bahnbrechende Technologie stünde uns heute nicht zur Verfügung, hätten Vorsicht und Zurückhaltung bei ihrer Einführung die Oberhand gewonnen. Ein Beispiel für eine mutige Innovation zeigte der deutsche Ingenieur und Automobilpionier Carl Friedrich Benz. Bereits im Jahr 1885 absolvierte er mit seinem Prototyp, dem funktionstüchtigen Benz-Patent-Motorwagen, die ersten Testrunden. In seinem Buch *Lebensfahrt eines Erfinders* erinnert sich Benz an seine ersten Ausflüge:

Hatte ich meine Versuchsfahrten bis dahin mit besonderer Vorliebe weitab von der Stadt vorgenommen – auf dem Fabrikgelände oder draußen auf dem alten, einsamen Wall (Ringstraße), der damals noch um die Stadt Mannheim sich herumzog und fast gar nicht begangen war –, so scheute ich vom Frühjahr 1886 ab die Menschen und ihre Kritik nicht mehr. [34]

Als der Motorwagen allerdings bei einer Panne liegenblieb, erntete Benz Mitleid, Spott und Hohn:

Wie kann man sich in so einen unzuverlässigen, armseligen, lautlärmenden Maschinenkasten setzen. (...) Wenn ich einen solchen Stinkkasten hätte, würde ich zu Hause bleiben. [34]

Trotz aller Verneinung und Ablehnung als Antwort auf das nächtelange beständige Arbeiten an seiner Lebensaufgabe hielt Benz mit Unterstützung seiner Frau am Glauben an die Zukunft seines Patentwagens fest und wurde damit Wegbereiter für eine der bedeutendsten Innovationen moderner Mobilität. Die Vorbereitung auf Fahrzeuge mit fortgeschrittenem Automatisierungsgrad erfordert ebenfalls eine konsequente Vorgehensweise nach dem Vorbild von Benz.

Auch die Markteinführung hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge muss sich bislang mit Barrieren auseinandersetzen. Die ersten Anbieter am Markt und damit die Pioniere gehen zunächst erhöhte Risiken ein, sodass sich der mögliche gesamtgesellschaftliche Nutzen durch diese neue Technologie nur gemeinsam umsetzen lässt. Homann beschreibt diesen Entscheidungskonflikt bei der Markteinführung durch das entscheidungstheoretische Konzept des sogenannten Gefangenendilemmas. Zur Überwindung der bei hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen vorliegenden Dilemmasituation müssen die unüberschaubaren Risiken für die Hersteller durch neue institutionelle Arrangements bewertbar und entscheidbar gemacht werden [35]. Vorbehaltlose Information und transparente Politik fördern und forcieren den fachübergreifenden gesellschaftlichen Dialog.

Bis heute muss der Fahrer aufgrund von Zulassungsvorgaben bei Serienfahrzeugen stets seine Hände am Lenkrad behalten und besitzt permanent die Kontrolle über das Fahrzeug. Auch automatisierte Forschungsfahrzeuge sowie absehbare Fahrzeugentwicklungen von IT-Unternehmen, Automobilherstellern und Zulieferern werden in absehbarer Zeit bei komplexen Verkehrssituationen einen Fahrer als verantwortliche Rückfallebene voraussetzen.

Fahrerlose Fahrzeuge hingegen bedeuten den Beginn einer völlig neuen Dimension. Neue Ansätze und Aktivitäten sind unabdingbar [36]. Es gilt, sich an der zukünftigen Möglichkeit des vollautomatisierten Fahrens zu orientieren, aus Mustern der Vergangenheit zu lernen und bisherige Vorgehensweisen innerhalb der technischen Eignung und wirtschaftlichen Zumutbarkeit dem Stand der Wissenschaft bzw. der Technik anzupassen [37].

Neben einer allgemeinen Klärung der Verantwortung für Unfall- und Produktrisiken können möglicherweise neue begleitende Maßnahmen wie Schulungen oder spezielle Fahrzeugbeobachtungen zur erfolgreichen Markteinführung und zum sicheren Betrieb beitragen. Für den erforderlichen Informationsaustausch, die Speicherung von Fahrzeugdaten (beispielsweise Event Data Recorder) und möglichen kriminellen Eingriffen sind abgestimmte technische Schutzvorkehrungen vorzusehen (s. Kap. 25, 30). Neben abgestimmten Datenschutzrichtlinien werden Experten der Technikethik, beispielsweise in einem Code of Ethics, die Einhaltung ethischer Werte sicherstellen (vgl. Abb. 28.3, 28.4, 28.5). Dabei sind Sicherheitsanforderungen im Sinne der grundlegenden ethischen Frage „Wie sicher ist sicher genug?“ zu beantworten. Expertenerfahrungen können Entscheidendes zur Erhöhung der Sicherheit und zur Erfüllung von Kundenerwartungen bei akzeptablen Risiken beisteuern. Vor dem Hintergrund zunehmender Verbraucheranforderungen sind Expertenerfahrungen – insbesondere aus bisherigen Produkthaftungsverfahren – zur Erhöhung der Produktsicherheit im Entwicklungs- und Freigabeprozess unverzichtbar.

Zur Großserienvermarktung sicherer automatisierter Fahrzeugtechnologien – die sich zudem in einem vielschichtigen Gesamtsystem wiederfinden – sind interdisziplinär abgestimmte Prozesse erforderlich. Eine belastbare Beurteilung der Serienreife verlangt nach neuen harmonisierten Methoden für vergleichbare Sicherheitsnachweise, beispielsweise mittels Simulation relevanter Szenarien aus der Verknüpfung weltweit verfügbarer Unfalldaten (s. Kap. 17). Dies gilt ebenfalls für die Erfüllung gesetzlicher bzw. zulassungsrechtlicher Regelungen, bei der Ermittlung neuer Möglichkeiten zur Risikoverteilung (vgl. [38]) und bei der Schaffung von neuen Entschädigungseinrichtungen. Zum Nachweis der Sorgfaltspflicht im bestehenden Qualitätsmanagementsystem empfiehlt sich die Weiterentwicklung erfahrungsbasierter, international gültiger Richtlinien, Werkzeuge, Methodenbeschreibungen sowie Leitfäden mit Checklisten, die auf dem ADAS Code of Practice aufbauen [5, 39] und den praktizierten Stand von Wissenschaft und Technik innerhalb der technischen Eignung und wirtschaftlichen Zumutbarkeit repräsentieren und dokumentieren. Der ADAS Code of Practice wurde zur sicheren Inverkehrbringung künftiger Advanced Driver Assistance Systems mit aktiver Unterstützung der primären Fahraufgabe (Quer-, Längsführung inklusive vollautomatisierter Notbremseingriffe) erarbeitet und 2009 über die European Automobile Manufacturers Association (ACEA) veröffentlicht. Er korrespondiert mit der ISO 26262 zu den Anforderungen der funktionalen Sicherheit von elektrischen, elektronischen und programmierbaren Systemen. Als Entwicklungsleitlinie enthält er auch Empfehlungen für die Analyse und Beurteilung komplexer Mensch-Maschine-Interaktionen, wie sie im normalen Gebrauchsfall sowie im Fehlerfall auftreten können [5, 6]. Bei unerwarteten Fehlfunktionen, die zukünftig zu größeren Schäden führen können, sind Produktexperten aus der Entwicklung in die Ursachenforschung einzubeziehen und anzuhören. Sachverständige, die nicht direkt in die Entwicklung eingebunden sind, sollten sich die Fachkompetenz für eine fundierte Begutachtung neuer Technologien vor Gericht aneignen.

Automatisiertes Fahren erfordert in der Entwicklung vernetztes, fachübergreifendes Denken mit einem flexiblen und zugleich strukturierten Handlungsraum. Die Entwicklung erschließt bislang eine unbekannte Welt mit vielen Unsicherheiten, die Vorbehalte und Widerstände verursachen können. Für eine erfolgreiche Einführung serienreifer Fahrzeuge bilden *in vivo* gesammelte Erkenntnisse aus Vergangenheit und Gegenwart die entscheidende Voraussetzung. So wird die Serienreife trotz technischer, rechtlicher und ökonomischer Risiken zum Nutzen der Gesellschaft möglich.

Literatur

1. Bengler K, Flemisch F (2011) Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung – Grundlegende Ergonomische Fragestellungen, 5. Darmstädter Kolloquium: kooperativ oder autonom? Darmstadt
2. Bengler K, Dietmayer K, Färber B, Maurer M, Stiller C, Winner H (2014) Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives, IEEE Intelligent Transportation System Magazine, ISSN 1939-1390, Volume 6, Issue 4, S. 6–22

3. Gasser T, Arzt C, Ayoubi M, Bartels A, Bürkle L, Eier J, Flemisch F, Häcker D, Hesse T, Huber W, Lotz C, Maurer M, Ruth-Schumacher S, Schwarz J, Vogt W (2012) Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Wirtschaftsverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F83) Bergisch Gladbach
4. Bundesgerichtshof (2009) Zur Haftung eines Fahrzeugherstellers, BGH-Urteil vom 16.06.2009, Az. VI ZR 107/08, Karlsruhe
5. Knapp A, Neumann M, Brockmann M, Walz R, Winkle T (2009) Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, Preventive and Active Safety Applications, eSafety for road and air transport, European Commission Integrated Project, Response 3, European Automobile Manufacturers Association – ACEA, www.acea.be, Brüssel
6. Donner E, Winkle T, Walz R und Schwarz J (2007) RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS), In: Technischer Kongress 2007, Verband der Automobilindustrie (VDA), Sindelfingen, S. 231–241
7. Nader R (1965) Unsafe at Any Speed: The Designed-In Dangers of the American Automobile, Grossman Publishers, Inc., New York
8. Nader R (1972) Unsafe at Any Speed: The Designed-In Dangers of the American Automobile, Expanded edition, Grossman Publishers, Inc., New York
9. Kraftfahrtbundesamt Jahresberichte (2014) <http://www.kba.de>, Flensburg
10. United States of America (2000) Transportation Recall Enhancement, Accountability, and Documentation TREAD Act – H.R. 5164, and Public Law No. 106–414
11. Noll M, Rapps P (2012) Ultraschallsensorik, In: Winner H, Hakuli S, Wolf G (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, S. 110–122, Vieweg+Teubner, Wiesbaden
12. Krey V, Kapoor A (2012) Praxisleitfaden Produktsicherheitsrecht, Hanser, 2. Auflage, München
13. Köhler H (2012) BGB Bürgerliches Gesetzbuch, Deutscher Taschenbuch Verlag, 69. Auflage, München
14. European Commission (1985) Council Directive 85/374/EEC of 25 July 1985 on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States concerning liability for defective products, Brüssel
15. International Organization for Standardization (ISO), ISO 9001 (2015) Quality management systems – Requirements, Genf
16. International Organization for Standardization (ISO), ISO/TS 16949 (2009) Particular requirements for the application of ISO 9001 for automotive production and relevant service part organizations – Functional safety, Genf
17. Akamatsu M, Green P, Bengler K (2013) Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present and Future, In: International Journal of Vehicular Technology, Hindawi Publishing Corporation, Kairo, New York
18. Hartley R F (2011) Management Mistakes and Successes, 25th Anniversary Edition, 1. Auflage, USA 2011, S. 342
19. National Highway Traffic Safety Administration (2014) Recall: Electrical System: Ignition Switch, NHTSA Campaign Number: 14V-047, Report Receipt Date: February 7, 2014, <http://www.nhtsa.gov>
20. National Highway Traffic Safety Administration (2014) Additional Information on Toyota Recalls and Investigations, <http://www.nhtsa.gov>
21. National Highway Traffic Safety Administration (2014) Recall: Forward Collision Avoidance, Adaptive Cruise Control, Vehicle Speed Control, Accelerator Pedal, NHTSA Campaign Number: 14V293000, Report Receipt Date: June 4, 2014, <http://www.nhtsa.gov>
22. International Organization for Standardization (ISO), ISO 26262 (2011) Road Vehicles – Functional safety, Genf
23. Grunwald A (2013) Handbuch Technikethik, J.B. Metzler, Stuttgart

24. Merkel A, Töpfer K, Kleiner M, Beck U, Dohnany K, Fischer U, Glück A, Hacker J, Hambrecht J, Hauff V, Hirche W, Hüttl R, Lübke W, Marx R, Reisch L, Renn O, Schreurs M, Vassilidis M, Bachmann G, Sauer I, Teuwsen R, Thiel G (2011) Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung Deutschlands, Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft, Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, S. 24 ff, Berlin
25. Association for the Advancement of Automotive Medicine (2005) The Abbreviated Injury Scale (AIS) Update 2008, Barrington IL
26. Werdich M (2012) FMEA – Einführung und Moderation – durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
27. Verband Deutscher Automobilhersteller (2006) VDA-Band 4, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz – Produkt- und Prozess-FMEA, 2. Auflage, Frankfurt/Main
28. Heising B, Ersoy M, Gies, S (2013) Hardware-in-the-loop Simulation, In Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven, 4. Auflage, S. 574–575, Springer Vieweg, Wiesbaden
29. Maurer M (2012) Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner H, Hakuli S, Wolf G (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, S.43–52, Vieweg Teubner, Wiesbaden
30. Bengler K, Zimmermann M, Bortot D, Kienle M, Damböck D (2012) Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems. In: Information Technology, Wissenschaftsverlag Oldenburg
31. Bundesgerichtshof (1986) Zur Produktbeobachtungspflicht für Kombinationsrisiken – Gefahrenabwendungspflicht, BGH-Urteil vom 9.12.1986, Az. VI ZR 65/86, Karlsruhe
32. Europäische Union (2010) Amtsblatt L 22 – Entscheidung der Kommission zur Festlegung von Leitlinien für die Verwendung des gemeinschaftlichen Systems zum raschen Informationsaustausch RAPEX gemäß Artikel 12 und des Meldeverfahrens gemäß Artikel 11 der Richtlinie 2001/95/EG über die allgemeine Produktsicherheit, Luxemburg
33. Becker S, Brockmann M, Jung C, Mihm J, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2004) ADAS – from Market Introduction Scenarios towards a Code of Practice for the Development and Evaluation, RESPONSE 2, European Commission, Final Public Report, Brüssel
34. Benz C (1925) Lebensfahrt eines deutschen Erfinders, Die Erfindung des Automobils, Erinnerungen eines Achtzigjährigen, Neuausgabe zur 50-jährigen Erinnerung, Koehler & Amelang, März 1936, Leipzig
35. Homann K (2005) Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand, In: Maurer M, Stiller C (Hrsg.) Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, S. 239–244, Springer, Berlin, Heidelberg
36. Matthaei R, Reschka A, Rieken J, Dierkes F, Ulbrich S, Winkle T, Maurer M (2015) Autonomes Fahren, In: Winner H, Hakuli S, Lotz F, Singer C (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, S. 1146–1168, Vieweg Teubner, Wiesbaden
37. Scharmer O, Kaufer K (2013) Leading from the emerging future – from Ego-System to Eco-System economies – applying theory U to transforming business, society and self, Berrett-Koehler Publishers, San Francisco CA
38. Donner E, Schollinski H-L, Winkle T, Jung C, Dilger E, Kanz C, Schwarz J, Bastiansen E, Andreone L, Becker S, Mihm J, Jarri P, Frost F, Janssen W, Baum H, Schulz W, Geissler T, Brockmann M (2004) Methods for Risk-Benefit-Analysis of ADAS: Micro Perspective and macroscopic socioeconomic evaluation, RESPONSE 2, European Commission Public Report, Project Deliverable D2, Brüssel
39. Becker S, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2003) Introduction of RESPONSE 2, EU Projekt. In: M. Maurer, C. Stiller (Hrsg.), Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS, Leinsweiler

Barbara Lenz, Eva Fraedrich

Das autonome Fahren stellt eine Herausforderung nicht nur für die weitere technische Entwicklung, sondern auch für den Umgang mit den neuen technischen Möglichkeiten dar. Während Medienberichte über autonome Fahrzeuge in der jüngeren Zeit deutlich zugenommen haben, steht die öffentlich geführte Diskussion zu damit verbundenen Erwartungen, aber auch Befürchtungen noch ganz am Anfang. Fragen und Themen, die die Menschen in Verbindung mit dem autonomen Fahren bewegen, ebenso wie Erfahrungen, die bei der Einführung neuer Technologien in der Vergangenheit gemacht wurden und die es bei der Realisierung von autonomem Fahren zu bedenken gilt, sind Gegenstand der Kapitel in diesem letzten Teil des Buches. Dass diese Fragen das Buch abschließen, kommt nicht von ungefähr: Eine Technologie ist immer eingebettet in einen Rahmen, der darüber bestimmt ist, wie die Menschen mit dieser Technologie umgehen, welche Bedeutung sie ihr zuschreiben und auch, welche gesellschaftlichen Funktionen sie erfüllt. Dies ist auch die zugrunde liegende Motivation, das Buch mit dem Thema *Mensch und Maschine* zu beginnen und mit dem Thema *Akzeptanz* zu beschließen.

Gesellschaftliche und individuelle Akzeptanz des automatisierten Fahrens ist Gegenstand des Beitrags von Eva Fraedrich und Barbara Lenz. Die Autorinnen erläutern und diskutieren die Vielschichtigkeit von „Akzeptanz“ und versuchen, damit der oft inflationären und manchmal auch ungenauen Verwendung dieses Begriffes ein fundiertes Verständnis entgegenzusetzen. Was bedeutet es eigentlich, wenn Menschen eine neue Technologie „akzeptieren“? Anhand der Auswertung von Leser-Kommentaren in nationalen und US-amerikanischen Zeitschriften zeigen sie auf, welche Themen derzeit die Diskussion antreiben, und kommen dabei zu markanten Ergebnissen.

Ist die Einführung von autonomem Fahren eigentlich mit der Einführung einer Großtechnologie vergleichbar? Und wie gehen wir dann mit den Risiken um, die von dieser Großtechnologie ausgehen oder auszugehen scheinen? Armin Grunwald untersucht in seinem Beitrag *Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren – Analyse, Einordnung und Bewertung* die Frage, welche Risikokonstellation beim autonomen Fahren

vorliegt und was aus den bisherigen Erfahrungen mit Risikodebatten zum technischen Fortschritt für Entwicklung und Einsatz des autonomen Fahrens gelernt werden kann. Der Autor entwickelt eine Reihe von Empfehlungen, die bei der Implementierung von autonomem Fahren Relevanz entfalten, und betont gleichzeitig die Notwendigkeit eines offenen und transparenten Austausches mit den potenziellen Nutzerinnen und Nutzern der neuen Technologie, aber auch den Verkehrsteilnehmern insgesamt.

Das autonome Fahren ist nicht als gänzlich neue Technologie zu verstehen, die quasi „aus dem Nichts“ kommt. Vielmehr schließt es immer auch an schon Vorhandenes an, z. B. an bestehende Alltagspraktiken der Nutzung eines (Individual-)Fahrzeugs. Vor diesem Hintergrund beschäftigten sich Eva Fraedrich und Barbara Lenz mit dem Thema *Vom (Mit-) Fahren: autonomes Fahren im Zusammenhang mit Autonutzung*. Auf der Grundlage einer empirischen Auseinandersetzung mit den Bedürfnissen, Empfindungen und Erfahrungen von Autonutzerinnen und -nutzern legen sie die Vielschichtigkeit der Einstellungen zur Automatisierung des Fahrens dar und zeigen insbesondere, in welchem Zusammenhang Vorbehalte zum autonomen Fahren stehen. Gleichzeitig machen sie deutlich, dass zum aktuellen Zeitpunkt die Bewertung von autonomem Fahren einerseits ganz wesentlich davon abhängig ist, welche gesellschaftlichen Gruppen dabei adressiert werden, und andererseits davon, um welche konkreten Anwendungen bzw. Szenarien es beim autonomen Fahren eigentlich geht.

Akzeptanz oder Nicht-Akzeptanz von autonomem Fahren wird sich früher oder später auch im (privaten oder gewerblichen) Kauf oder Nicht-Kauf eines autonomen Fahrzeugs zeigen. Wie verändert sich dabei die Bedeutung der Automarke angesichts der Tatsache, dass das „neue“ Auto mehr können muss als fahren? David Woisetschläger setzt sich in seinem Beitrag *Marktauswirkungen des automatisierten Fahrens* mit der Frage auseinander, was – aus Sicht der heutigen Autonutzer – künftig das relevantere Akzeptanzkriterium sein könnte: die Erfahrung des Autobauers oder die des Softwareherstellers. Er legt dar, dass derzeit die Kaufbereitschaft für ein autonomes Fahrzeug noch recht gering ausgeprägt ist und dass es dabei eher gleichgültig ist, in welcher Branche das Fahrzeug entwickelt worden ist; wichtiger ist, dass die Marke, unter der das Fahrzeug vertrieben wird, hohes Vertrauen genießt. Woisetschlägers Kapitel schließt mit seinem Beitrag zur individuellen Kaufbereitschaft diesen letzten Teil des Buches, indem ein Bogen von der generellen Akzeptanz hin zu eher individuellen Aspekten gespannt wird.

Eva Fraedrich, Barbara Lenz

Inhaltsverzeichnis

29.1 Einführung 640

29.2 Akzeptanz 641

 29.2.1 (Technik-)Akzeptanz: Konzepte, Forschung und Ausprägungen 642

**29.3 Akzeptanz des autonomen Fahrens: Forschungsstand
und Forschungsschwerpunkte** 645

**29.4 Exploration des Themas aus der Perspektive
von Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmern** 648

 29.4.1 Methode 648

 29.4.2 Ergebnisse 649

29.5 Fazit und Ausblick 656

Literatur 658

E. Fraedrich (✉)
Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Deutschland
eva.fraedrich@geo.hu-berlin.de

B. Lenz
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V, Institut für Verkehrsforschung, Deutschland
Barbara.Lenz@dlr.de

„A good science fiction story should be able to predict not the automobile but the traffic jam“, meint Frederik Pohl ([41], S. 287).

29.1 Einführung

In der Diskussion um das autonome Fahren rückt neben technischen und rechtlichen Fragestellungen mehr und mehr auch die Frage in den Fokus, welche Einstellungen und Erwartungen künftige (potenzielle) Nutzerinnen und Nutzer, aber auch eine gesellschaftliche Öffentlichkeit der neuen Technologie entgegenbringen. Die aufkommende Debatte trägt der Annahme Rechnung, dass ein Wechsel vom konventionellen zum autonomen Fahren deutliche Veränderungen für alle Verkehrsteilnehmer mit sich bringen würde. Ausgehend von einer solchen individuellen wie auch gesellschaftlichen Nutzerperspektive stellt sich damit die Frage nach der Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen: Inwieweit ist die oder der Einzelne bereit, ein vollautomatisiertes Fahrzeug zu nutzen, und inwieweit sind wir als Gesellschaft bereit, ein Verkehrssystem zu akzeptieren, in dem vollautomatisierte Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sind?

Die öffentliche Aufmerksamkeit für das autonome Fahren ist in der letzten Zeit deutlich gewachsen – in Befragungen gibt mittlerweile eine Mehrheit an, immerhin schon vom autonomen Fahren „gehört“ zu haben (vgl. [1]). In der massenmedialen Berichterstattung wird die Automatisierung des Fahrens häufig als Lösung für viele unserer Automobilbedingten Verkehrsprobleme vorgestellt; darüber hinaus wird erwartet, dass es zu einer Revolutionierung von Autonutzung und Autobesitz kommt. Der Begriff „autonomes Fahren“ weist allerdings in der öffentlichen Debatte noch starke definitorische Unschärfen auf, mal ist dabei vom automatisierten Fahren und von selbstfahrenden oder fahrerlosen Fahrzeugen die Rede, mal vom teil- oder vollautomatisierten Fahren. Häufig ist nicht ganz klar, um welche Arten der Beförderungsmöglichkeiten es sich handelt, welche konkreten Möglichkeiten und Potenziale, aber auch welche Risiken damit verbunden sind oder welche Herausforderungen auf dem Weg zum autonomen Fahren noch bewältigt werden müssen.

Die Perspektiven aus der Sicht von Verkehrsteilnehmern und potenziellen künftigen Nutzerinnen und Nutzern werden dabei wenig beachtet, wenngleich immer wieder betont wird, dass eine nutzer- sowie eine nutzenorientierte Betrachtung ganz wesentlich zur Akzeptanz und damit auch zum Erfolg automatisierter Fahrzeuge beitragen kann (vgl. [2], [3]). Die frühzeitige Einbindung der Akzeptanz-Thematik in die Debatte um autonomes Fahren ist notwendig, auch wenn die Realisierung eines Straßenverkehrs mit vollständig automatisierten Fahrzeugen derzeit noch gar nicht absehbar ist. Mit der Einführung der Technologie werden möglicherweise Veränderungen im gesamten Bereich der Mobilität einhergehen, die viele gesellschaftliche Ebenen betreffen und gleichzeitig einen fundamentalen Wandel der Art und Weise, wie wir uns fortbewegen, auslösen könnten. Um die wesentlichen Aspekte eines solchen Wandels frühzeitig zu kennen und den Wandel gegebenenfalls zu steuern, ist es wichtig, bedeutende Einflussfaktoren, und dazu gehört die Akzeptanz der Technologie, zu identifizieren und ihre Dynamik zu verstehen.

Der vorliegende Beitrag beginnt mit einer Bestimmung dessen, was unter (Technik-) Akzeptanz zu verstehen ist, und diskutiert anschließend, welche Forschungsschwerpunkte im Zusammenhang mit autonomem Fahren relevant sind. Der empirische Teil wird mit Ergebnissen aus aktuellen Studien zur Akzeptanz des autonomen Fahrens eingeleitet, bevor anschließend Ergebnisse einer eigenen Untersuchung vorgestellt werden, die der Sicht heutiger Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer nachspürt und auf diese Weise Erkenntnisse für künftige, noch stärker anwendungsbezogene Empirie zur Akzeptanz des autonomen Fahrens gewinnt.

29.2 Akzeptanz

Wenn die Rede von Akzeptanz ist, wird darunter ganz allgemein „annehmen, hinnehmen, billigen; anerkennen; mit jemandem oder etwas einverstanden sein“ verstanden ([4], S. 136). In diesen Formulierungen ist als Sinngehalt die „Bereitschaft zu etwas“ enthalten, was der Akzeptanz eine aktive Komponente gibt. Damit unterscheidet sie sich auch von der bloßen Duldung, dem Ausbleiben von Widerstand, aber auch von der Toleranz. Akzeptanz vollzieht sich im Rahmen von sozialen und technischen Konstruktionsprozessen – d. h., sie ist abhängig von Personen, deren Einstellungen, Erwartungen und Handlungen, ihrer Umwelt, ihrer Werte- und Normrahmung etc., aber auch von Veränderungen im Lauf der Zeit (vgl. [4], [5]). Der prozesshafte und wandelbare Charakter von Akzeptanz macht sie insgesamt zu einem „instabile(n) Konstrukt“ ([6], S. 25) – abhängig von Akzeptanzsubjekt, -objekt, -kontext, verschiedenen Ausprägungen und Typen; außerdem kann sie in ihrem zeitlichen Verlauf stark variieren [7].

Für die Akzeptanz einer konkreten Technologie wie dem autonomen Fahren bedeutet dies z. B., dass sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene neben technischen Optionen verschiedene Nutzungsoptionen oder auch Risikobefürchtungen gegeneinander abgewogen werden. Eine Technologie kann ihre „ursprüngliche Bestimmung“ auf diese Weise im Verlauf verändern, bevor sie schließlich stärker gefestigt oder sogar institutionalisiert wird – speziell der Verkehrsbereich ist voller Beispiele hierfür, angefangen bei der ursprünglichen Erfindung der Eisenbahn ausschließlich für Gütertransporte bis hin zur Nutzung von Kabinenseilbahnen als öffentliches Verkehrsmittel in dicht bebauten innerstädtischen Gebieten. Dieses Prozesshafte von Technikgenese und Technikaneignung stellt die Forschung zur Akzeptanz vor besondere Herausforderungen: In unterschiedlichen Phasen der Technologieentwicklung, -implementation und -aneignung sind jeweils verschiedene Akteure bzw. Akteursgruppen akzeptanzrelevant. Wenn man Akzeptanz im Rahmen eines solchen sozio-technischen Transformationsprozesses (vgl. [8]) betrachtet, müssen die verschiedenen Phasen des Prozesses unterschieden werden, denn sie entfalten je unterschiedliche Relevanz in Bezug auf die Akzeptanz.

29.2.1 (Technik-)Akzeptanz: Konzepte, Forschung und Ausprägungen

Das Thema Technikakzeptanz ist ein recht inhomogenes Feld; verschiedene Wissenschaftsdisziplinen (z. B. Psychologie, Soziologie, Wirtschaftswissenschaften etc.) nehmen wechselseitig aufeinander Bezug und bedienen sich gegenseitiger Anleihen. Insgesamt ist Akzeptanzforschung noch ein relativ junges Forschungsfeld: Erst in den 1970er Jahren kam mit einer breiteren öffentlichen Kritik an der Atomenergietechnik und einer daraus abgeleiteten und, wie sich im Nachhinein herausgestellt hat, eher unzulässig postulierten allgemeinen Technikfeindlichkeit der Deutschen (s. hierzu auch Kap. 30 zum Thema Risiko) vermehrt die Frage nach Akzeptanz auf ([9], [10], S. 45 ff.).

Die Ziele von Akzeptanzforschung bestehen einerseits darin, das jeweilige Akzeptanzphänomen besser verstehen zu können (sozialwissenschaftlich-empirische Analysen); andererseits soll es möglich werden, spezifische Akzeptanzobjekte, z. B. eine bestimmte Technologie, derart zu entwickeln und zu gestalten, dass Akzeptanz eintritt (normativ-ethische Ansätze). Auf wissenschaftlicher sowie politischer Ebene haben sich aus diesen Bedarfen heraus neben unterschiedlichen Forschungsansätzen mittlerweile auch mehrere Institutionen herausgebildet, die die Entwicklung von (neuen) Technologien und die dazugehörigen Debatten begleiten ([10], S. 47 ff.). Allen diesen Institutionen liegt im Kern die Annahme zugrunde, dass Technik nicht ohne ihre Einbettung in gesellschaftliche und wirtschaftliche, aber auch nutzenbezogene Bereiche betrachtet werden kann, letztendlich also ihre Einbettung in das sozio-technische System mitberücksichtigt werden muss (vgl. z. B. [10], [11]).

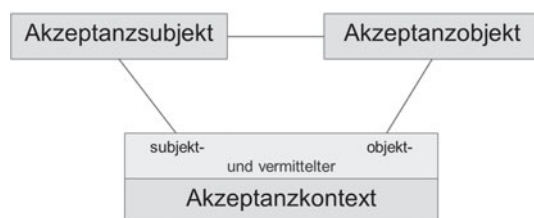
29.2.1.1 Akzeptanzsubjekt, -objekt und -kontext

Akzeptanz entfaltet sich immer in einem Spannungsfeld von Subjekt, Objekt und Kontext (vgl. [12], S. 88 ff.): „Anzugeben ist nicht nur, was, sondern was von wem innerhalb welcher Gesellschaft, in welcher Situation und zu welchem Zeitpunkt sowie aus welchen Gründen akzeptiert (oder eben abgelehnt) wird“ ([12], S. 90). Abbildung 29.1 zeigt die Beziehung zwischen Subjekt, Objekt und Kontext der Akzeptanz.

Akzeptanzsubjekt

Ein Akzeptanzsubjekt verfügt über Einstellungen oder entwickelt Einstellungen in Bezug auf den Gegenstand der Akzeptanz und verbindet sie gegebenenfalls auch mit entsprechenden Handlungen (vgl. [11], [12]). Der Begriff „Subjekt“ bezeichnet in diesem Zusammen-

Abb. 29.1 Akzeptanzsubjekt, -objekt und -kontext (angelehnt an [12], S. 89)



hang allerdings nicht nur Individuen, sondern kann sich auch auf Gruppen, Institutionen oder die Gesellschaft als Ganzes beziehen.

Eine Annäherung an die Akzeptanzsubjekte von autonomem Fahren kann derzeit z. B. über Nutzerinnen und Nutzer des Verkehrssystems hergestellt werden, die künftig entweder aktiv oder passiv mit autonomem Fahren zu tun haben. Infrage kommen also demnach alle, die in irgendeiner Form, sei es als Autofahrer, Radfahrer oder Fußgänger, am aktuellen Straßenverkehrssystem teilhaben. Weitere relevante Akzeptanzsubjekte sind darüber hinaus etwa Entwickler und Ingenieure, Politiker und Unternehmer oder auch öffentliche Forschungsinstitutionen.

Akzeptanzobjekt

Das Akzeptanzobjekt beschreibt nicht unbedingt ein Objekt im eigentlichen Sinn, sondern bezieht sich auf die Aneignung von „Angebotenem, Vorhandenem oder Vorgeschlagenem“ ([12], S. 89). Dies kann Technik bzw. Technologie sein, es können aber auch Artefakte aller Art oder Personen, Einstellungen, Meinungen, Argumente, Handlungen oder gar die dahinterstehenden Werte und Normen sein. Ein solches Objekt erfährt seine Bedeutung wiederum erst durch individuell oder gesellschaftlich vorgenommene Zuschreibungen – es gibt also gar nicht *das* autonome Fahren an sich; die Frage ist vielmehr, welche spezifischen Funktionen autonomes Fahren erfüllen kann und welche individuelle und gesellschaftliche Bedeutung die Technologie darüber erfährt. Dahinter steht die Annahme, dass Technik und Technologien keine Bedeutung per se haben, sondern diese erst im Zusammenhang mit der Erfüllung sozialer Funktionen, menschlichem Handeln und der Einbettung in gesellschaftliche Strukturen erlangen (vgl. [8]).

Akzeptanzkontext

Der Akzeptanzkontext beschreibt das Umfeld, in dem sich ein Akzeptanzsubjekt auf ein Akzeptanzobjekt bezieht – und kann somit nur in Abhängigkeit von diesen beiden betrachtet werden. Der Kontext von autonomem Fahren beispielsweise ist u. a. bestimmt durch die derzeitige individuelle oder soziale Bedeutung der Autonutzung: Warum nutzen Menschen das Auto? Welche Einstellungen, Werte, Erwartungen etc. liegen der (auto)mobilen Praxis zugrunde? Fügt sich das autonome Fahren hier nahtlos ein – oder wird es die Bedeutung der (Auto)Mobilität und deren Normensystem verändern?

29.2.1.2 Dimensionen von Akzeptanz

In der vielfältigen Literatur zu Akzeptanz und zur Akzeptanzforschung wurden unterschiedliche Dimensionen bzw. Ebenen identifiziert, auf denen Akzeptanz sichtbar und vor allem erfassbar wird. Im Folgenden wird insbesondere auf die Einstellungs-, Handlungs- und Wertdimension von Akzeptanz eingegangen.

Einstellungsdimension

Auf der Ebene der Einstellungen werden Haltungen, Wertungen, Einschätzungen usw. von Akzeptanz erhoben – Einstellungen können dabei sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene abgefragt und interpretiert werden. Fragen zur Genese von Technik,

ihre spezifischen Nutzungsformen oder die damit verbundenen Herausforderungen und Rahmenbedingungen im jeweils spezifischen Kontext können mit solchen Einstellungsmessungen gleichwohl nicht erfasst werden ([10], S. 46). Einstellungen haben aber für die Akzeptanzforschung deshalb Bedeutung, weil angenommen wird, dass diese als Absichten und Bereitschaften zu konkreten Handlungen gelesen werden können ([12], S. 82 f.).

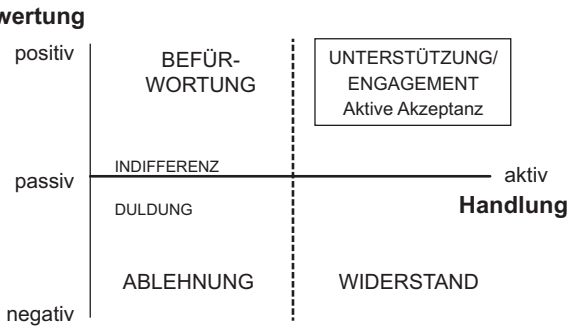
Das typische Messinstrument der Einstellungsdimension von Akzeptanz ist die Meinungsumfrage – auch wenn solche Erhebungen „... schnell zu einem vereinfachten Bild eines Meinungsbildungsprozesses auf der Basis wahrgenommener Eigenschaften von Technik ...“ führen ([13], S. 35), denn sie implizieren, dass Technik Signale aussendet, die wiederum bei der Bevölkerung bzw. Individuen bestimmte Reaktionen auslösen. Die eindimensionale Erfassung von Einstellungen wurde allerdings im Laufe der letzten Jahre mit erweiterten Erkenntnissen zur Technikakzeptanz abgelöst und um Analysen erweitert, die insbesondere den Kontext solcher Einstellungen mit einbeziehen. Auf diese Weise wurde der Fokus von Akzeptanzforschung von der „deskriptive(n) Bestandsaufnahme von Einstellungen und Haltungen“ ([13], S. 36) hin zu einer eher analytisch ausgerichteten Sichtweise verschoben. Damit wird der Komplexität von Wahrnehmung und Bewertung durch Individuen, der Subjektivität auch von Expertinnen und Experten sowie der Bedeutung von Kontextabhängigkeit stärker Rechnung getragen [13].

Handlungsdimension

Die Handlungsdimension von Akzeptanz beschreibt das beobachtbare Verhalten, wobei sich Handeln in diesem Sinn sowohl auf Tun als auch auf Unterlassen beziehen kann. (Handlungs-)Aktivitäten können sich vielfältig äußern, so z. B. im Kauf, in der Nutzung, in der Propagierung (oder dem Gegenteil davon: etwa dem Initiieren von Protesten) oder in der Unterstützung von (Entscheidungs- und Planungs-)Aktivitäten.

Häufig wird die Handlungsdimension als eigentliche oder tatsächliche Ebene der Akzeptanz betrachtet, so z. B. bei Lucke (vgl. [12], S. 82). Andere Autorinnen und Autoren sehen dagegen eine konkrete Handlungsabsicht bzw. eine Handlung als nicht zwingend für Akzeptanz ([14], S. 19; [15], S. 11). Die wechselseitige Bezugnahme auf Handlungs- und Einstellungsdimension haben Schweizer-Ries et al. ([15], S. 11) in einem zweidimensionalen Modell abgebildet (s. Abb. 29.2).

Abb. 29.2 Zwei Dimensionen des Akzeptanzbegriffs ([15], S. 11)



Wertdimension

Die Wertdimension wird in vielen Ansätzen nicht als eigenständige Ebene von Akzeptanz betrachtet, sondern mit der Einstellungsdimension zusammengefasst. Werte und Normen, so die Argumentation, sind auch Basis von Einstellungen und daher nur schwer von diesen zu trennen. Relevanz entfaltet die Wertdimension aber z. B. dann, wenn Akzeptanz auf der Handlungsebene beobachtet werden kann (etwa in der Nutzung eines spezifischen Produkts), obwohl sie möglicherweise gar nicht oder nur bedingt mit subjektiv-individuellen Werten übereinstimmt – eine Person kann ein Auto nutzen und besitzen, aber gleichzeitig an einem stark ökologischen Leitbild orientiert sein, das sich wiederum in anderen Handlungsbereichen deutlicher zeigen kann (beispielsweise darin, generell nur im Bio-Supermarkt einkaufen zu gehen). Als durchaus herausfordernd werden im Zusammenhang mit autonomem Fahren auf einer gesellschaftlichen Ebene ethische Kriterien bzw. Maßstäbe betrachtet, die der Bewertung zum autonomen Fahren zugrunde liegen (müssen) (s. Kap. 4 und Kap. 5). Generell wird ein Akzeptanzobjekt immer auch in Abhängigkeit von einem vorhandenen Normen- und Wertesystem bewertet (vgl. [13]).

29.2.1.3 Forschung zu Akzeptanz

Akzeptanz vollzieht sich nicht nur auf verschiedenen Ebenen (s. o.), sondern ist auch das Ergebnis eines komplexen individuellen und kollektiven Bewertungs- und Aushandlungsprozesses und manchmal sogar von relativ unspezifischen „Befindlichkeiten“ ([7], S. 55). Damit geht auch die Frage einher, wie ein solcher Prozess messbar und damit empirisch zugänglich gemacht werden kann. Für eine relativ neue Technologie wie das autonome Fahren gilt es zudem zu bestimmen, auf welche Weise einzelne Akteure (z. B. Nutzerinnen und Nutzer), soziale Gruppen, Organisationen und Institutionen den Herausforderungen des technisch-wissenschaftlichen Fortschritts begegnen. Damit verbunden ist auch das Ziel, „... Gestaltungspotenziale für gesellschaftliche Herausforderungen zu identifizieren und technologische Optionen im Hinblick auf ihren Problemlösungsbeitrag zu prüfen ...“ ([11], S. C).

Für die Akzeptanzforschung kann zusammenfassend festgehalten werden, dass Akzeptanz „... ein komplexes, vielschichtiges Konstrukt ist, das nicht direkt und unmittelbar messbar ist, und für das auch keine ‚geeichten‘ Messinstrumente zur Verfügung stehen ...“ ([11], S. 21). In Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Akzeptanzobjekt, aber auch abhängig von den relevanten Dimensionen können nur jeweils spezifische Indikatoren operationalisiert und messbar gemacht werden – damit werden andere wiederum zwangsläufig ausgeschlossen. Dies gilt es, im Forschungsprozess mit zu reflektieren.

29.3 Akzeptanz des autonomen Fahrens: Forschungsstand und Forschungsschwerpunkte

Autonomes Fahren kann den Produkt- und Alltagstechniken zugerechnet werden; im Gegensatz zu Arbeitstechniken und sogenannter externer Technik wie beispielsweise Kern-

energietechnik, Satellitentechnik etc. werden die Produkt- und Alltagstechniken hauptsächlich über den Markt gesteuert und sind eher individuelles Konsumprodukt, dessen Folgen allerdings auch Dritte betreffen können ([13], S. 31). Autonutzung und -besitz sind typische Beispiele aus dem Bereich der Produkt- und Alltagstechnik. Akzeptanz der Technik bedeutet in diesem Zusammenhang vor allem den Kauf, schließt aber in der Regel auch die Nutzung mit ein. Für das autonome Fahren kann allerdings angenommen werden, dass vor allem zu Beginn einer möglichen Implementation nicht nur die Ebene des privaten bzw. individuellen Konsums eine Rolle spielt, sondern dass auch die Auswirkungen auf unterschiedliche gesellschaftliche Bereiche öffentlich diskutiert und abgewogen werden. Hier könnte es dann z. B. um die Frage gehen, ob Fahrzeuge in unserem Verkehrssystem zugelassen werden können, die wahrscheinlich genau wie konventionelle Fahrzeuge in Unfälle verwickelt sein werden – allerdings mit dem Unterschied, dass dann möglicherweise der Fahrroboter bzw. die Maschine einen solchen Unfall schuldhaft verursacht und auf diese Weise nicht nur die Sicherheit der jeweiligen Fahrzeuginsassen gefährdet hat, sondern die aller Verkehrsteilnehmer. Letztlich ginge es also auch um eine Frage des Gemeinwohls (vgl. hierzu insbesondere Kap. 30 zur Risikobewertung und Kap. 4 zur Ethik des autonomen Fahrens). Denkbar sind auch andere soziale oder ökonomische Risiken oder Folgen, die mit dem autonomen Fahren einhergehen könnten und damit im Fokus der öffentlichen Auseinandersetzung stehen werden. Empirisch von Bedeutung wird daher auch sein, die Grenzen zwischen diesen beiden Bereichen, den individuellen und gesellschaftlichen Aspekten von Akzeptanz, möglichst klar herauszuarbeiten und zu klären, „... wie Zuschreibungen von Techniken als intern oder extern gesteuert zustande (kommen)“ ([13], S. 32). Generell kann für Deutschland keine Technikfeindlichkeit festgestellt werden, und für den Bereich der individuell genutzten Techniken gilt sogar eher umgekehrt, dass in Deutschland Produkte aus dem Bereich der Alltagstechnik in großem Umfang in vielen Haushalten zur Verfügung stehen und genutzt werden (vgl. [9], [16]).

Im Zusammenhang mit der Akzeptanz von autonomem Fahren ist häufig die Rede davon, dass autonome Fahrzeuge nur dann akzeptiert würden, wenn sie einerseits „besser“ fahren würden als der Mensch und andererseits die Fahrzeugnutzerin oder der Fahrzeugnutzer als „letzter Kontrollentscheider“ die autonome Funktion überstimmen könnte (vgl. [3], S. 2 ff.) – dass Risikowahrnehmung aber um ein Vielfaches komplexer ist, als solche Aussagen vermuten lassen, erläutert u. a. Grunwald in diesem Band (s. Kap. 30).

Analogien zu anderen Technologien und damit Akzeptanzerfahrungen aus diesen Bereichen sind tendenziell nur schwierig herzustellen. Obwohl es heute schon viele Beispiele automatisierter Verkehrssysteme gibt (etwa Flugzeug, Schiff, (U-)Bahn oder Fahrzeuge im Militärbereich), ist ihnen allen gemeinsam, dass sie immer noch über eine menschliche Kontroll- bzw. Steuerungsinstanz verfügen – ein Fahrzeug oder Mobilitätssystem ohne diese menschliche Instanz gibt es derzeit noch nicht ([3], S. 6). Aus diesem Grund könnte autonomes Fahren auch ganz spezifische Anforderungen an Akzeptanz nach sich ziehen.

Welche Faktoren, Ausprägungen, Anforderungen, Erwartungen, Werthaltungen von wem und an wen oder was etc. überhaupt in Zusammenhang mit der Akzeptanz autonomen Fahrens stehen, ist derzeit empirisch noch nicht ausreichend erfasst. Einige Untersuchun-

gen aus der Markt- und Meinungsforschung, die sich mit dem Thema befassen, haben zwar eine generelle und auch zunehmende Offenheit gegenüber dem autonomen Fahren feststellen können (vgl. [1], [15], [16], [17], [18]). Nicht klar ist dabei allerdings, was die Befragten unter „autonomem Fahren“ eigentlich verstehen, in welchen Kontext ihre Wahrnehmungen und Bewertungen eingebettet sind und welche Herausforderungen und Hürden, aber auch welcher Nutzen im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren identifiziert werden können.

Auf Nutzerseite unterliegen Befragungen, die Einschätzungen zum autonomen Fahren direkt abprüfen, derzeit außerdem noch der Herausforderung, dass bisher weder von einem breiten Kenntnisstand noch von konkreten Erfahrungen mit der Technologie ausgegangen werden kann. Solche erfassten Einstellungen und Bewertungen sind deshalb möglicherweise auch nur bedingt valide, denn der Gegenstand der Befragung ist, weil kaum bekannt, noch nicht eindeutig definiert. Dies legen auch Peters und Dütschke in ihrer Untersuchung über Akzeptanz von Elektromobilität nahe: „Befragungen potenzieller Nutzer etwa per Fragebogen, ob bzw. unter welchen Umständen sie bereit wären, ein Elektroauto zu kaufen, haben das Problem, dass Einschätzungen zu dem neuen, noch wenig bekannten System der Elektromobilität für die Konsumenten schwierig sind. Sie beruhen in der Regel auf einem Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen auf der Basis bisheriger Mobilitätsmuster“ ([19], S. 6). Eine vergleichbare Einschätzung kann wohl auch auf das autonome Fahren übertragen werden.

Die wenigen Untersuchungen, die Aspekte von Akzeptanz autonomen Fahrens in den Blick genommen haben, vermitteln teilweise ein recht heterogenes Bild: Frost & Sullivan zeigen in ihrer Studie zu aktiven und passiven Sicherheitssystemen, dass bei der Mehrheit der Autonutzerinnen und -nutzer bisher ein grundsätzlicher Widerstand gegenüber der Vorstellung besteht, die Kontrolle über die Steuerung ihres Fahrzeugs an eine Maschine bzw. einen Roboter abzugeben [20]. Andere Befragungen wiederum zeigen, dass vor allem jüngere Fahrerinnen und Fahrer zwischen 19 und 31 Jahren das Fahren selbst oft als lästig empfinden – die Fahraufgabe verhindere nämlich, dass man sich während der Fahrt anderen, als wichtiger, bedeutungsvoller oder interessanter eingeschätzten Tätigkeiten widmen kann: „Regulation keeps trying to say texting is distracting to driving but for the consumer it is really the driving that is distracting to texting“ ([21], S. 2). Eine Umfrage zu Wünschen von Europäerinnen und Europäern an das zukünftige Auto hat außerdem ergeben, dass etwa zwei Drittel der Befragten dem autonomen Fahren gegenüber eher aufgeschlossen sind [18], und eine internationale Erhebung, bei der Autofahrerinnen und Autofahrer aus Deutschland, China, den USA und Japan befragt wurden, konnte zwar einerseits eine prinzipielle Offenheit gegenüber dem autonomen Fahren konstatieren, aber andererseits auch zeigen, dass über alle Länder hinweg eine große Zahl der Befragten derzeit an der sicheren Funktionsweise der Technologie (noch) Zweifel hat oder diese sogar eher beängstigend findet [1].

29.4 Exploration des Themas aus der Perspektive von Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmern

Bei der Frage nach der Akzeptanz des autonomen Fahrens muss es, auch vor dem Hintergrund der oben beschriebenen mangelnden Eindeutigkeit der Empirie, zuallererst darum gehen, herauszufinden, wie das Akzeptanzobjekt überhaupt wahrgenommen wird und auch, welche Aspekte mit der Technologie in Verbindung gebracht werden, die entweder auf einer gesellschaftlichen oder einer individuellen Ebene akzeptanzrelevant sind. Ziel muss es sein, erste Hinweise in Bezug auf die Einstellungs- und Wertdimension der Akzeptanz zu gewinnen sowie konkrete Erwartungen, Hoffnungen, Wünsche, aber auch Befürchtungen zu identifizieren, die mit der Technikentwicklung, -nutzung und -gestaltung verbunden werden (vgl. [11]). Den Auftakt der Arbeiten zur individuellen und gesellschaftlichen Akzeptanz, die im Rahmen des Projektes „Villa Ladenburg“ durchgeführt wurden, bildete deshalb eine Explorationsstudie, die die Perspektive der heutigen Verkehrsteilnehmer ganz allgemein und damit auch möglicher künftiger Nutzerinnen und Nutzer von autonomen Fahrzeugen betrachtet und dabei wesentliche Aspekte des wahrgenommenen Nutzens aus einer subjektiven Perzeption heraus in den Blick nimmt. Die Erhebung adressiert auch Unterschiede, die zwischen verschiedenen kulturell-gesellschaftlichen Umfeldern registriert werden können – in diesem Fall zwischen Deutschland und den USA, die zu den tonangebenden Ländern im Automobilbereich zählen und wo eine breitere Diskussion um autonomes Fahren schon begonnen hat. Dies zeigt in erster Linie die mediale Berichterstattung zum Thema, die in den letzten zwei Jahren merklich zugenommen hat und ein Indikator dafür ist, dass autonomes Fahren allmählich an gesellschaftlicher Aufmerksamkeit gewinnt.

29.4.1 Methode

Im Rahmen der Untersuchung wurden Aussagen aus Kommentaren zum autonomen Fahren analysiert. Der methodische Zugang erfolgte über die Auswertung der Rezeption von Online-Artikeln weit verbreiteter Printmedien; diese Rezeption ist in Form von online verfügbaren Kommentaren seitens der Nutzerinnen und Nutzer nachvollziehbar. Die Herangehensweise bezieht insbesondere die Annahme mit ein, dass der mediale Diskurs einen entscheidenden Einfluss auf die individuelle und gesellschaftliche Meinungsbildung hat (vgl. [22]). Ein Kriterium für die Auswahl der Artikel war, dass die Online-Nachrichtenportale, in denen sie veröffentlicht wurden, ein „repräsentatives“ Bild der deutschen und US-amerikanischen Printmedienlandschaft spiegeln und somit davon ausgegangen werden kann, dass die Artikel den aktuellen öffentlichen Diskurs zum autonomen Fahren einerseits wiedergeben und andererseits mitprägen. Für Deutschland wurden Kommentare zu Beiträgen aus Bild [23], Die Welt [24], Frankfurter Allgemeine Zeitung [25], Heise online [26], Spiegel Online ([27], [28], [29]), Süddeutsche.de [30] und Zeit Online [31], für die USA Los Angeles Times [32], NY Daily News [33], The New York Times [33], San Francisco

Chronicle [34], The Wall Street Journal [36] und The Washington Post [37] ausgewertet. Insgesamt wurden auf diese Weise 827 Kommentare zu 16 Artikeln analysiert. Die meisten Artikel bezogen sich auf die Straßenzulassung der Google Driverless Cars in Kalifornien Ende September 2012, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Im Sinne einer „konzeptuellen Repräsentativität“ wurde ein theoretisches Sampling vorgenommen ([38], S. 154 ff.), d. h., im Verlauf der Analyse wurden stufenweise weitere Kommentare ausgewertet, die schließlich drei Vergleichsgruppen zugeordnet werden konnten: (1) Kommentare aus deutschen Massenmedien-Portalen, (2) Kommentare aus US-amerikanischen Massenmedien-Portalen und (3) Kommentare aus einem technologieaffinen, deutschen Portal (Heise online). Die Auswertung erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring [39], deren Ziel es ist, (insbesondere die nicht offenkundigen) Bedeutungen von Texten mithilfe einer systematischen und intersubjektiv überprüfbaren Analyse, die der Interpretationsbedürftigkeit und Bedeutungsfülle sprachlichen Materials gerecht wird, herauszuarbeiten. Das Resultat der (zusammenfassenden) Inhaltsanalyse ist ein induktiv entwickeltes Kategoriensystem ([39], S. 67 ff.), das darstellt, wie das Thema „autonomes Fahren“ aus Sicht der Online-Kommentierenden diskutiert und verhandelt wird, welche Aspekte und Eigenschaften wahrgenommen und auf welche Art diese bewertet werden. Dazu wurden alle Kommentare kodiert – die kleinste Kodiereinheit innerhalb eines Kommentars war ein einzelnes Wort. Auf diese Weise wurden insgesamt 1421 Kodierungen vorgenommen und in aufeinanderfolgenden Reduktions- und Abstraktionsschritten zum Kategoriensystem zusammengefasst.

29.4.2 Ergebnisse

Das aus knapp sechzig Kategorien und Subkategorien bestehende Kategoriensystem ist auf zwei Ebenen verteilt: Auf einer objektbezogenen und gleichzeitig eher sachlichen Ebene wurden Aussagen erfasst, die (positive sowie negative) wahrgenommene Eigenschaften der Technologie sowie daran angeschlossene Themen zu allgemeinen und spezifischen Entwicklungsmöglichkeiten, aber auch zu rechtlichen Rahmenbedingungen, Haftungsvarianten etc. beinhalten – solche Aussagen sind vor allem am Akzeptanzobjekt orientiert und gleichzeitig eng mit dem Akzeptanzkontext verknüpft. Auf einer stärker emotionalen Ebene geht es dagegen um das Akzeptanzsubjekt – Aussagen werden meist in direkten Bezug zur eigenen Person gesetzt und beinhalten Einstellungen, Bewertungen und subjektive Motivationen zum autonomen Fahren. Auch diese sind wiederum meist stark mit dem Akzeptanzkontext verbunden, beispielsweise mit dem Kontext von Autonutzung und -besitz. Rund 15 Prozent aller Aussagen konnten dem Forschungsgegenstand nicht zugeordnet werden und blieben daher ohne Relevanz. Abbildung 29.3 zeigt das Kategoriensystem in einer reduzierten grafischen Übersicht, und Tab. 29.1 enthält die prozentuale Verteilung der Aussagen auf zwei Ebenen sowie die allgemeinen Kennzahlen der Erhebung.

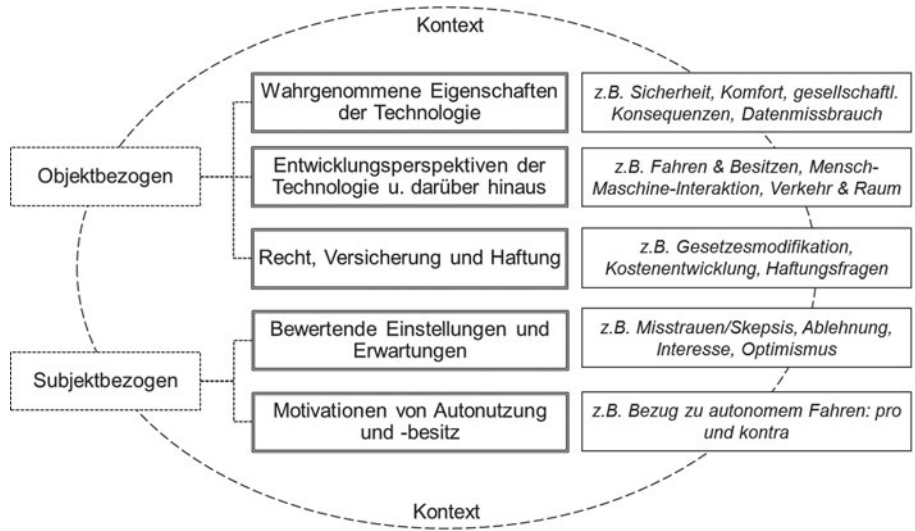


Abb. 29.3 Zwei-Ebenen-Kategoriensystem

Tab. 29.1 Verteilung von Aussagen, allgemeine Kennzahlen

	D	USA	Heise online		D	USA	Heise online
Ebene	Nennung in %			Ebene	Nennung in %		
Sachlich/objektbezogen	43%	47%	48%	Affektiv/subjektiv	43%	32%	33%

	D	USA	Heise online
Politisch-ideologische Konnotation	0%	8%	0%
Aussagen ohne Relevanz	14%	13%	19%
Kommentare gesamt	314	322	191
Fälle gesamt	214	221	82
Kodierungen gesamt	536	527	358

29.4.2.1 Objektbezogene Ebene

Wahrgenommene Eigenschaften und Folgen autonomer Fahrzeuge

Verteilt auf die drei Vergleichsgruppen (Massenmedien D bzw. USA; technologieaffin/ Heise online) konnten zwischen 43 und 48 Prozent aller Aussagen der objektbezogenen Ebene zugeordnet werden – eine Auswahl der Kategorien und ihrer prozentualen Verteilung zeigt Tab. 29.2. In den Kommentaren werden konkrete Erwartungen in Bezug auf die Eigenschaften autonomer Fahrzeuge geäußert, aber auch in Bezug auf mögliche

Tab. 29.2 Aussagenverteilung von n = 647 auf einer sachlich-objektbezogenen Ebene

	D	USA	Heise online		D	USA	Heise online
<i>Kategorie</i>	<i>Nennung in %</i>			<i>Kategorie</i>	<i>Nennung in %</i>		
Eigenschaften, Folgen autonomer Fahrzeuge	60%	66%	27%	Haftung, Versicherung & Recht	21%	16%	19%
<i>Positiv</i>	71%	61%	70%	Haftungsthemen	75%	34%	51%
Sicherheit, Zuverlässigkeit	39%	39%	37%	Gesetzesmodifikation	19%	8%	28%
Flexibilität, Komfort	28%	18%	30%	Kostenentwicklung	6%	24%	18%
Beitrag zur Verkehrsoptimierung	11%	11%	9%	Zivilrechts-Auseinandersetzungen	0%	34%	3%
Integrative Verkehrsteilnahme	8%	10%	0%	Entwicklungsperspektiven	19%	18%	54%
Fortschritt	5%	17%	6%	Gesellschaft & Allgemein	11%	11%	9%
Nachhaltigkeit	5%	3%	9%	Technik & Fahrzeugdesign	23%	29%	35%
Kostenersparnis	4%	2%	9%	Mensch-Maschine-Interaktion	2%	7%	25%
<i>Negativ</i>	29%	39%	30%	Verkehr & Raum	25%	11%	7%
Gesell. Konsequenzen	47%	63%	22%	Fahren & Besitzen	39%	29%	24%
Datenmissbrauch	18%	11%	14%	Fragen	0%	13%	0%
Mängel technischer Infrastruktur	15%	11%	0%				
Teuerung	10%	5%	57%				
Unklarheiten	10%	10%	7%				

Veränderungen und Folgen von Verkehrs- und Gesellschaftssystem sowie des rechtlichen Rahmens. Mindestens zwei Drittel solcher antizipierten Eigenschaften und Konsequenzen sind deutlich positiv konnotiert, in den deutschen Medien-Kommentaren sind es sogar um die 70 Prozent. Sie können sich z. B. auf einen erwarteten Sicherheitsvorteil autonomer Fahrzeuge beziehen, von denen erwartet wird, in Zukunft Unfälle im Straßenverkehr deutlich zu reduzieren, wenn nicht sogar gänzlich zu verhindern – ein User formuliert es so: „Eigentlich sollte so ein Auto aber wesentlich sicherer unterwegs sein als mit Fahrer. Denn es hat viel mehr Sensoren für die Wahrnehmung zur Verfügung, kann in alle Richtungen gleichzeitig gucken und hat eine Reaktionsfähigkeit nahe null.“

Auf der negativen Seite werden vor allem gesellschaftliche Konsequenzen befürchtet, darunter etwa der Verlust von Arbeitsplätzen: „Woran diese Typen arbeiten, ist konkret der Wegfall der deutschen Autoindustrie. Kein Kerl wird sich noch einen Porsche oder einen dicken Benz kaufen, wenn er damit genau so herumgeschwurbelt wird wie Otto Normal-

verbraucher. ... Wegfall der deutschen Autoindustrie bedeutet: ca. 25 Prozent höchstqualifizierte Arbeitsplätze weniger.“

Weitere Aspekte, die mit autonomen Fahrzeugen in den Aussagen in Verbindung gebracht wurden, waren – auf der positiven Seite – Flexibilität und Komfort, Verkehrsoptimierung und Effizienz, integrative Verkehrsteilnahme („Fahr-Ertüchtigung“ von derzeit eingeschränkten Verkehrsteilnehmern), allgemeiner Fortschritt, der mit der Technologie einhergeht, und Kostenersparnis. Auf der negativen Seite wurden neben befürchteten gesellschaftlichen Konsequenzen außerdem die Themen Datenmissbrauch, Mängel in der technischen Infrastruktur – also die Annahme, dass solche Fahrzeuge nicht sicher (genug) sein werden – Teuerung und relativ unspezifisch formulierte Unklarheiten bezüglich der Funktionsweise des Fahrzeugs genannt. Damit existiert zu den auf der positiven Seite wahrgenommenen Eigenschaften auch mehrfach deren negativer Gegenpart (Sicherheit versus Mängel, Kostenersparnis versus Teuerung, Fortschritt versus gesellschaftliche Konsequenzen).

Haftung, Versicherung und Recht

Themen, die der Auswertung zufolge vor allem in Deutschland besonders präsent zu sein scheinen, sind Haftung, Versicherung und Recht – mit erwarteten Modifikationen von gesetzlichen Rahmenbedingungen gehen auch versicherungstechnische Veränderungen einher. Für fast die Hälfte der Aussagen dazu auf den deutschen Massenmedienportalen bedeutet dies in erster Linie Unsicherheit: „Dieses Auto ist kein technisches, sondern ein juristisches Problem. Wer ist denn schuld, wenn das Auto einen Unfall baut? Der Fahrer oder Google?“, meint dazu ein User. Aber auch in den US-amerikanischen Kommentaren wird ein offensichtlich länderspezifisches Problem thematisiert, wenn auch häufig eher ironisch – die als streit- und prozesssüchtig charakterisierte Autoversicherungs- und -haftungs-Anwaltschaft könnte einer Einführung von autonomen Fahrzeugen im Weg stehen: „Leave it to the trial lawyers to spoil the party!“ fasst diese Auffassung in einem Satz zusammen. Außerdem werden bei diesem Thema noch Fragen nach künftig notwendiger Gesetzesmodifikation und der Kostenentwicklung im Versicherungsbereich diskutiert.

Entwicklungsperspektiven zum autonomen Fahren

Vor allem auf Heise online befassen sich viele der Kommentar-Schreibenden mit Entwicklungsperspektiven im Zusammenhang mit autonomem Fahren, die bereits weit über ausschließlich mit der Technologie assoziierte Eigenschaften hinausgehen (54 Prozent aller objektbezogenen Kommentare, s. Tab. 29.2) – solche Aussagen können gesellschaftliche Entwicklungen in einem eher allgemeinen Sinn betreffen, aber auch die künftige Entwicklung von Autonutzung und -besitz, das Design und die Ausstattung der Fahrzeuge, die Interaktion zwischen Mensch und Maschine oder auch Überlegungen zur zukünftigen Gestaltung von Verkehr und (städtischem) Raum. Ein User beschäftigt sich etwa mit den Folgen veränderter gesetzlicher Rahmenbedingungen: „Die Frage ist also nicht mehr: Wer haftet, wenn es Unfälle bei autonomen Autos gibt, sondern: Wer bekommt noch eine Erlaubnis, manuell zu fahren?“

Tab. 29.3 Aussagenverteilung für n = 516 auf einer affektiv-subjektiven Ebene

	D	USA	Heise online		D	USA	Heise online
<i>Codes/Ebenen</i>	<i>Nennung in %</i>			<i>Codes/Ebenen</i>	<i>Nennung in %</i>		
Bewertungen, Einstellungen, Erwartungen	86%	84%	78%	Motivation Auto-nutzung und -besitz	14%	16%	22%
<i>negativ</i>	48%	53%	37%	Allgemein	34%	27%	20%
Misstrauen, Skepsis	76%	67%	91%	Bezug zu autonomem Fahren	66%	73%	80%
Ablehnung	24%	33%	9%	- Pro auton. Fahren	48%	21%	25%
<i>positiv</i>	35%	35%	30%	- Contra auton. Fahren	43%	79%	25%
Optimismus, Vertrauen	55%	43%	44%	- Besitz, Carsharing	9%	0%	50%
vorstellbar, wünschenswert	35%	47%	41%				
grundsätzliches Interesse	10%	10%	15%				
<i>ambivalent</i>	17%	12%	33%				

29.4.2.2 Subjektbezogene Ebene

Bewertende Einstellungen und Erwartungen

Kommentare in den Online-Foren bestehen in der Regel aus mehreren Aussagen, die verschiedenen Ebenen oder (Sub-)Kategorien zugeordnet werden können – häufig sind dabei Aussagen auf der eher „sachlichen“ mit solchen auf der subjektiv-emotionalen Ebene verknüpft; wenn mit dem autonomen Fahrzeug z.B. negative Eigenschaften assoziiert werden, steht der Verfasser oder die Verfasserin des Kommentars der Nutzung der Technologie meist ebenfalls eher ablehnend gegenüber und vice versa. „Ich will nicht das Steuer aus der Hand geben! – und schon gar nicht an einen Computer, den man manipulieren und hacken kann, wie den PC und das Handy!“ verbindet in dieser Aussage Sicherheitsbefürchtungen (ein autonomes Fahrzeug wird, ähnlich einem Computer, möglicherweise nicht sicher sein, Daten könnten missbraucht werden) mit subjektiver Ablehnung. Andersherum kann etwa die Erwartung, dass autonome Fahrzeuge besonders komfortabel und flexibel sind, mit positiver persönlicher Bewertung der Technologie einhergehen: „Vollautomatisiertes Fahren ohne nervige Mitfahrer, ohne Zugaussfälle und Verspätungen – wäre schon sehr cool“. Nicht immer sind Aussagen auf den unterschiedlichen Ebenen allerdings miteinander verknüpft; Bewertungen können z.B. auch ohne Angabe näherer Gründe vorgenommen werden, so wie diese aus US-amerikanischen Online-Portalen: „Yes. Easiest question I’ve been asked all day!“ oder „Jerry, I support you, but not on this“ („Jerry“ bezieht sich hier auf den Gouverneur von Kalifornien, Jerry Brown, der 2012 die Straßenzulassung der Google Driverless Cars medienwirksam im Google-Hauptquartier erteilte).

Generell wird die Technologie zwar deutlich *positiv wahrgenommen* (s. o. – „Wahrgenommene Eigenschaften und Folgen“), dabei aber eher ambivalent bis *negativ bewertet*

(über zwei Drittel aller Aussagen in dieser Kategorie sind nicht positiv konnotiert (s. Tab. 29.3), wobei sich Misstrauen und Skepsis entweder auf die technische Entwicklung, die Sinnhaftigkeit oder aber die Umsetzbarkeit und Machbarkeit der Technologie beziehen. In der Kategorie der ambivalenten Aussagen geht es vor allem um Voraussetzungen und Konsequenzen (auf technischer, gesellschaftlicher oder Infrastruktur-Seite), die als wesentlich identifiziert werden, bevor autonomes Fahren positiv bewertet werden könnte.

Autonutzung und -besitz

Die Wahrnehmung von autonomem Fahren ist stark mit subjektiven und persönlichen Motiven der eigenen Autonutzung verwoben. Die Analyse konnte hier zwei gegensätzliche Pole der Bewertung von autonomem Fahren identifizieren: Auf der einen Seite stehen Aussagen, in denen die Motivation zur Autonutzung aufgrund von Komfort und Flexibilität des Autos sowie aufgrund „allgemeiner“ Vorteile des motorisierten Individualverkehrs betont wurde. Solche Aussagen enthalten i.A. auch eine eher positive Einschätzung und Bewertung des autonomen Fahrens: „Das Auto hat doch vor allem diesen fast ubiquitären Charakter, weil es so praktisch ist. Ich fände es praktischer, wenn ich mir so ein auto-Auto online an meine Haustür sekundengenau ordern kann und mich vor jedem Ziel absetzen lassen kann, ohne mich um den Parkplatz zu kümmern. Wenn diese Zukunftsvision möglich wird: Goodbye Porsche.“ Auf der anderen Seite sind Aussagen, die Aspekte von Freiheit, Individualität, Kontrolle und den Spaß am Autofahren hervorheben, meist auch mit einer skeptischen bis ablehnenden Haltung gegenüber der neuen Technologie verknüpft: „Wo bleibt da der Spaß am Selbstfahren? Technik hin oder her: Ich möchte selbst bestimmen über mein Fahrzeug und kein Computer.“ Darüber hinaus thematisieren einige User ganz allgemein, welche Motive und Einstellungen der eigenen Autonutzung zugrunde liegen oder setzen sich mit der Frage auseinander, warum man in einer Zukunft mit autonomen Fahrzeugen das eigene Auto schließlich abschaffen würde (oder eben gerade nicht).

29.4.2.3 Vergleiche der Gruppen: Deutschland, USA und Heise online

Viele Wahrnehmungen, Einschätzungen, Perspektiven und Werthaltungen haben in allen drei Gruppen ähnliche Ergebnisse gezeigt, dennoch konnten in einigen Bereichen auch deutliche Unterschiede ausgemacht werden, die entweder länderspezifisch oder wissensspezifisch waren (für die Kommentare auf Heise online konnte angenommen werden, dass hier ein deutlich größeres Wissen zum Thema autonomes Fahren vorhanden war sowie ein größeres Verständnis von Technik und Technologie allgemein). Neben den bereits erwähnten Themen zu Haftung, Versicherung und Recht und zu Entwicklungsperspektiven, die als je gruppenspezifisch charakterisiert werden konnten, hat die Analyse auch gezeigt, dass US-amerikanische Kommentare im Vergleich zu ihren deutschen Pendanten deutlich häufiger eine stark gesellschaftspolitisch konnotierte Betrachtung des autonomen Fahrens vornehmen (s. Tab. 29.1). Darüber hinaus hat die Auswertung zu den Themen Autonutzung und -besitz gezeigt, dass auf US-amerikanischer Seite deutlich jene Kommentare überwiegen, bei denen Spaß, individuelle Freiheit und Steuerungskontrolle im Zentrum der Motivation zur Autonutzung stehen. Damit geht gleichzeitig meist eine ablehnende Haltung

gegenüber dem autonomen Fahren einher (79 Prozent in den USA gegenüber 43 Prozent bei den deutschen Massenmedien-Kommentaren und nur 25 Prozent bei den technologieaffinen Kommentaren).

Die Haftungsfragen wurden insgesamt bei Heise online am stärksten kontrovers diskutiert, während auf US-amerikanischer Seite in den wenigen Aussagen zu diesem Thema alle Schreibenden die Haftung künftig beim Hersteller sehen. Die Autoren von Kommentaren in der Gruppe von Spiegel Online und Co., also bei den deutschen Massenmedien, finden dagegen mehrheitlich (58 Prozent), dass auch in Zukunft die Haftung bei der Halterin oder dem Halter des Fahrzeugs liegen sollte.

Der Grundton der Kommentare auf den deutschen Portalen ist insgesamt etwas positiver: Sowohl auf Heise online als auch in den Foren der anderen Medienportale werden häufiger als auf den US-amerikanischen Medienportalen positive Eigenschaften des autonomen Fahrens thematisiert (70 Prozent und 71 Prozent gegenüber 61 Prozent) und gleichzeitig weniger negative Bewertungen vorgenommen (37 Prozent und 48 Prozent gegenüber 53 Prozent).

29.4.2.4 Zusammenfassung

In den US-amerikanischen ebenso wie in den deutschen Leser-Kommentaren, die auf den Massenmedien-Portalen verfügbar waren, überwiegen Aussagen, die derzeit noch stark an den erwarteten Eigenschaften der autonomen Fahrzeuge selbst orientiert sind. Das heißt, das Akzeptanzobjekt ist in der Tat das physische Objekt Auto und seine individuelle Nutzung. Auf Heise online stellt sich dies anders dar – die Diskussionen gehen bereits weit über die Orientierung am rein „Technischen“ hinaus und thematisieren konkrete Nutzungsszenarien bzw. sehen autonomes Fahren stärker in Zusammenhang mit dem gesamten sozio-technischen System der (Auto-)Mobilität. Da die meisten Schreibenden auf diesem Portal offensichtlich bereits über mehr Wissen in Bezug auf die Technologie verfügen als „normale“ Medienrezipienten, kann vermutet werden, dass mit dem Fortschreiten der öffentlichen Debatte zum autonomen Fahren (die ja erst im Laufe der letzten zwei Jahre an Fahrt aufgenommen hat) solche Themen an Relevanz gewinnen werden, die nicht nur die Technologie an sich betreffen, sondern auch ihre Einbettung in das System, also stärker den Akzeptanzkontext einbeziehen.

Insgesamt spannt die Untersuchung den derzeit gültigen „Akzeptanzraum“ zum Thema autonomes Fahren auf. Dieser Akzeptanzraum ergibt sich aus den Themen, die aktuell die über die Medien geführte Debatte in der Gesellschaft strukturieren und gleichzeitig mit spezifischen Wertungen verbunden sind. Betrachtet man die Breite an Themen, dann zeigt sich zwar, dass dem autonomen Fahrzeug überwiegend positive Eigenschaften zugewiesen, daneben allerdings auch negative Eigenschaften identifiziert werden. Darüber hinaus wird eine Reihe von Fragen aufgeworfen, die aus Sicht der Kommentierenden noch der Klärung bedürfen und – je nachdem, wie diese Klärung ausfällt – ebenfalls Einfluss auf die Akzeptanz haben werden. Die Ambivalenz, die darin zum Ausdruck kommt, setzt sich fort, wenn die Äußerungen auf der sachlich-objektbezogenen Ebene um die Aussagen auf der affektiv-subjektiven Ebene ergänzt werden: Während das autonome Fahrzeug als solches eine

vornehmlich positive Bewertung erfährt, gibt es doch gleichzeitig ein ausgeprägtes Misstrauen und eine deutliche Skepsis bis hin zur Ablehnung gegenüber dem autonomen Fahren und der Einführung von autonomen Fahrzeugen in das Verkehrssystem. Diese Einstellung ist besonders häufig mit der Angst vor negativen sozialen Folgen, aber auch vor dem Verlust von Freiheit assoziiert.

Eine solche ambivalente Haltung gegenüber autonomem Fahren ist allerdings typisch für die Einstellung gegenüber Technik – und spiegelt die Ergebnisse aus anderen Untersuchungen zur Technikakzeptanz (in Deutschland) wider [13]: Auf der einen Seite werden mit dem autonomen Fahren viele Vorteile assoziiert, die das Leben komfortabler machen können und neue Potenziale eröffnen. Auf der anderen Seite geht mit den erwarteten Veränderungen auch die Angst vor negativen gesellschaftlichen Konsequenzen einher, die sich im „... Verlust an Kontrolle der eigenen Lebenswelt und der eigenen Lebenszeit ...“ ([13], S. 33) äußern. Dieser ambivalenten Haltung liegt der Wunsch zugrunde, „... Lebenswelt und Technik miteinander in Einklang zu bringen und die soziale, wirtschaftliche und natürliche Umwelt für zukünftige Generationen funktionsfähig zu erhalten ...“ ([13], S. 33). In der Debatte um autonomes Fahren, das hat die Analyse gezeigt, geht es also nicht nur darum, den motorisierten Individualverkehr sicherer, komfortabler, flexibler, effizienter usw. zu machen, sondern auch darum, aufzuzeigen und zu reflektieren, welche gesellschaftlichen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen autonomes Fahren mit sich bringen würde.

29.5 Fazit und Ausblick

Akzeptanzforschung, so wurde im vorliegenden Beitrag argumentiert, muss über die reine Erforschung von Meinungen und Einstellungen hinausgehen. Sie soll vielmehr im Sinne einer „antizipierenden gesellschaftlichen Marktforschung“ ([11], S. 3) Bedarfe, Vorstellungen, Wünsche, Hoffnungen, Befürchtungen und Ängste identifizieren und in den Zusammenhang eines sozio-technischen Systems – in diesem Fall des Verkehrssystems als Teil des gesamtgesellschaftlichen Systems – und seiner Entwicklung einordnen. Auf diese Weise können Potenziale und Optionen aufeinander abgestimmt werden (vgl. [40]). Ein komplexes Thema wie autonomes Fahren berührt unterschiedliche Bereiche unserer Gesellschaft, weshalb eine interdisziplinäre Zusammenarbeit wie im Projekt „Villa Ladenburg“ der Daimler und Benz Stiftung, das die Beiträge des vorliegenden Bandes initiiert und zusammengeführt hat, unumgänglich ist.

Künftige Untersuchungen zur Akzeptanz autonomen Fahrens sollten sowohl einen stärkeren Fokus auf kultur-, typen- und milieuspezifische Unterschiede der Akzeptanz als auch auf die Interdependenzen von Themenbereichen legen. Die Auswertung der Online-Kommentare hat hierzu erste wichtige Erkenntnisse geliefert und weist den Weg für künftige Erhebungen: Die ambivalenten Ergebnisse in Bezug auf die Motivation zur Autonutzung müssen genauer in den Blick genommen werden, um auf diese Weise einordnen zu können, welche individuelle, aber auch gesellschaftliche Bedeutung Autonutzung und -besitz heute hat, welche symbolischen, emotionalen und instrumentellen Eigenschaften

dem autonomen Fahrzeug zugeschrieben werden und welchen Einfluss auf die Akzeptanz von autonomem Fahren die aktuelle Autonutzung und der Autobesitz erwarten lassen. Kapitel 31 befasst sich insbesondere mit diesen Fragen.

Derzeit ist zumindest in der öffentlichen Debatte häufig noch gar nicht klar, worum es eigentlich geht, wenn vom autonomen Fahren die Rede ist – dies gilt sowohl für die mediale Rezeption der Technologie als auch deren Darstellung. Ist die Rede von autonomen (Privat-)Fahrzeugen, die der Fahrerin oder dem Fahrer dann und wann die Fahraufgabe abnehmen können? Oder geht es um fahrerlose Taxis, die, sozusagen „auf Kommando“, sowohl Personen als auch Güter jederzeit überallhin transportieren können? Gegenwärtig ist davon auszugehen, das hat auch die Auswertung gezeigt, dass viele Fragen, die mit einer möglichen künftigen Implementation autonomer Fahrzeuge in unser Verkehrssystem einhergehen, noch ungeklärt sind. Damit entzieht sich allerdings auch die Frage nach dem Nutzen von autonomem Fahren – sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene – einer eindeutigen Antwort. Momentan ist nur zu erahnen, welche Wertzuordnungen beim autonomen Fahren die wichtigsten Rollen einnehmen, auch wenn die vorliegende Untersuchung zumindest einen Einblick in die relevanten Themen geben konnte, die mit der Technologie assoziiert werden: Sicherheit, Komfort, Kostenersparnis, Umweltverträglichkeit, Zeitersparnis, Chancengleichheit etc.

Darüber hinaus ist der weiter oben beschriebene Kontext der Akzeptanz bzw. des autonomen Fahrens von zentraler Bedeutung für künftige Untersuchungen. Diesen Schluss lassen u. a. auch die Ergebnisse aus den US-amerikanischen Kommentaren mit stärker gesellschaftspolitisch konnotierten Aussagen zu: Hier scheint, aus Sicht der Kommentierenden, das autonome Fahren möglicherweise mit dem derzeit vorherrschenden Normen- und Wertesystem der Autonutzung zu kollidieren. Künftige Studien sollten deshalb die individuelle und gesellschaftliche Bedeutung der heutigen Autonutzung in den Blick nehmen und konkret danach fragen, wie diese in den Kontext von Alltagspraxis und kultur- bzw. milieuspezifischen Orientierungsrahmen eingebettet ist (s. hierzu auch Kap. 31). Darüber kann bestimmt werden, welche konkreten Aspekte in diesem Zusammenhang Auswirkungen auf die Akzeptanz des autonomen Fahrens erwarten lassen.

Im Sinne einer konkreteren Nutzenbestimmung bzw. Wertzuordnung wird es künftig auch darum gehen, Technologie für potenzielle Nutzerinnen und Nutzer oder Betroffene erfahrbar zu machen und eine Vorstellung davon zu ermöglichen, was von ihr erwartet werden, aber auch, was sie nicht leisten kann. In diesem Sinne könnten vor allem politische bzw. öffentliche Institutionen akzeptanz- oder zumindest zugangsfördernd wirken ([3], S. 3), indem sie die öffentliche Debatte stärker mitprägen oder konkrete Test- und Pilotprojekte für autonomes Fahren initiieren – zu den aktuellen Bestrebungen und Bemühungen von Seiten der Politik s. Kap. 8. An anderer Stelle im Projekt wurde bereits deutlich, dass spezifische Anwendungsfälle des autonomen Fahrens, wie sie über die Use-Cases (s. Kap. 2) eingeführt wurden, jeweils spezifische Bewertungen, Erwartungen und Einschätzungen mit sich bringen (s. Kap. 31 zum Thema Autonutzung und -besitz im Zusammenhang mit autonomem Fahren sowie auch Kap. 6, Kap. 12 und Kap. 33).

Literatur

1. Continental AG: Continental Mobilitätsstudie 2013. [http://www.continental-corporation.com/www/download/pressportal_com_en/\(general/ov_automated_driving_en/ov_mobility_study_en/download_channel/pres_mobility_study_en.pdf](http://www.continental-corporation.com/www/download/pressportal_com_en/(general/ov_automated_driving_en/ov_mobility_study_en/download_channel/pres_mobility_study_en.pdf). (2013). Zugriffen: 30. September 2014
2. Khan, A. M., Bacchus, A., Erwin, S.: Policy challenges of increasing automation in driving. *IATSS Research*. 35, 79–89 (2011)
3. Rupp, J. D., King, A. G.: Autonomous Driving – A Practical Roadmap. SAE International. <http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fma/marcom/convergence/data/papers/2010-01-2335.pdf> (2010). Zugriffen: 30. September 2014
4. Drosdowski, G.: Duden. Das große Wörterbuch der deutschen Sprache. Bd. 1., A-Bim. Dudenverlag, Mannheim (1993)
5. Hasse, M.: Know-how ohne Know why: Das Internet als virtuelles Akzeptanzobjekt. In: Lucke, D., Hasse, M. (Hrsg.) *Annahme verweigert: Beiträge zur soziologischen Akzeptanzforschung*, S. 187–213. Springer Fachmedien, Wiesbaden (1998)
6. Schäfer, M., Keppler, D.: Modelle der technikorientierten Akzeptanzforschung. Überblick und Reflexion am Beispiel eines Forschungsprojekts zur Implementierung innovativer technischer Energieeffizienz-Maßnahmen. Discussion Paper. Zentrum Technik und Gesellschaft, Berlin http://www.tu-berlin.de/fileadmin/f27/PDFs/Discussion_Papers/Akzeptanzpaper__end.pdf (2013). Zugriffen: 30. September 2014
7. Grunwald, A.: Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*. 14 (3), 54–60 (2005)
8. Geels, F.: *Technological transitions and system innovations, A Co-Evolutionary and Socio-Technical Analysis*. Cheltenham: Edward Elgar, Cheltenham (2005)
9. Acatech: *Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen: Anmerkungen zu einem aktuellen gesellschaftlichen Problem* (acatech bezieht Position). Springer-Verlag, Wiesbaden (2011)
10. Petermann, T., Scherz, C.: TA und (Technik-)Akzeptanz(-forschung). *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*. 14, 45–53 (2005)
11. Hüsing, B., Bierhals, R., Bührlen, B., Friedewald, M., Kimpeler, S., Menrad, K., Zoche, P.: *Technikakzeptanz und Nachfragemuster als Standortvorteil*. Fraunhofer ISI, Karlsruhe (2002)
12. Lucke, D.: *Akzeptanz: Legitimität in der „Abstimmungsgesellschaft“*. Leske + Budrich, Opladen (1995)
13. Renn, O.: *Technikakzeptanz: Lehren und Rückschlüsse der Akzeptanzforschung für die Bewältigung des technischen Wandels*. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*. 14, 29–38 (2005)
14. Dethloff, C.: *Akzeptanz und Nicht-Akzeptanz von technischen Produktinnovationen*. Dissertation, Universität zu Köln (2004)
15. Schweizer-Ries, P., Rau, I., Zoellner, J., Nolting, K., Rupp, J., Keppler, D.: *Aktivität und Teilhabe – Akzeptanz Erneuerbarer Energien durch Beteiligung steigern*. Projektabschlussbericht, Magdeburg & Berlin (2010)
16. Hampel, J., Renn, O.: *Technikakzeptanz und Kontroversen über Technik*. Bericht für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Stuttgart: Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg (2002)
17. AutoScout24 GmbH: *Unser Auto von morgen 2013/14* <http://ww2.autoscout24.de/special/unser-auto-von-morgen--2013-14/was-wuenschen-sichdie-europaeer-vom-auto-von-morgen/4319/392974/> (2013). Zugriffen: 30. September 2014
18. AutoScout24 GmbH: *Unser Auto von morgen. Studie zu den Wünschen der Europäer an das Auto von morgen* about.autoscout24.com/de-de/au-press/2012_as24_studie_auto_v_morgen_en.pdf. (2012). Zugriffen: 30. September 2014

19. Peters, A., Dütschke, E.: Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität – Analyse aus Expertensicht. Fraunhofer ISI, Karlsruhe (2010)
20. Frost & Sullivan: Customer Desirability and Willingness to Pay Active and Passive Safety Systems in Canada. Frost & Sullivan, Canada (2006)
21. Deloitte: Third Annual Deloitte Automotive Generation Y Survey “Gaining speed: Gen Y in the Driver’s Seat”. Deloitte Development LLC http://www.deloitte.com/assets/Dcom-UnitedStates/Local%20Assets/Documents/us_automotive_2011%20Deloitte%20Automotive%20Gen%20Y%20Survey%20FACT%20SHEET_012011.pdf (2011). Zugriffen: 30. September 2014
22. Dreesen, P., Kumięga, L., Spieß, C. (Hrsg.): Mediendiskursanalyse. Diskurse – Dispositive – Medien – Macht. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2012)
23. Anonymous.: Freie Fahrt für Googles Roboter-Autos. BILD.de www.bild.de/digital/multimedia/google/google-auto-darf-fahren-26404736.bild.html (2012). Zugriffen: 30. September 2014
24. Doll, N.: Selbstlenkendes Auto kommt schneller als man denkt. Die Welt. www.welt.de/wirtschaft/article109473825/Selbstlenkendes-Auto-kommt-schneller-als-man-denkt.html#disqus_thread. (2012). Zugriffen: 30. September 2014
25. Anonymous.: Kalifornien lässt fahrerlose Autos im Straßenverkehr zu. Frankfurter Allgemeine Zeitung. www.faz.net/aktuell/technik-motor/google-auto-kalifornien-laesst-fahrerlose-autos-im-strassenverkehr-zu-11904259.html. (2012). Zugriffen: 30. September 2014
26. Wilkens, A.: Bosch: Selbstfahrende Autos brauchen noch mindestens zehn Jahre. Heise online. <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Bosch-Selbstfahrende-Autos-brauchen-noch-mindestens-zehn-Jahre-1778920.html> (2013). Zugriffen: 30. September 2014
27. Hengstenberg, M.: Automatisiertes Fahren: Kein Mensch am Steuer? Ungeheuer!. Spiegel Online. www.spiegel.de/auto/aktuell/automatisiertes-fahren-2025-fahren-autos-selbststaendig-a-873582.html (2012). Zugriffen: 30. September 2014
28. Büttner, R.: Neues Gesetz in den USA: Kalifornien lässt autonome Pkw auf die Straßen. Spiegel Online. www.spiegel.de/auto/aktuell/neues-gesetz-in-kalifornien-duerfen-autonome-auto-auf-die-strassen-a-857988.html (2012). Zugriffen: 30. September 2014
29. Kröger, M.: Autonomes Fahren: Google-Auto erhält Straßenzulassung. Spiegel Online. www.spiegel.de/auto/aktuell/google-strassenzulassung-fuer-autonomes-auto-a-831920.html (2012). Zugriffen: 30. September 2014
30. Crocoll, S.: Hilf mir, Kumpel. Süddeutsche.de. www.sueddeutsche.de/auto/autos-die-sich-selbst-steuern-hilf-mir-kumpel-1.1479826 (2012). Zugriffen: 30. September 2014
31. Biermann, K.: Google: Kalifornien lässt autonome Autos auf die Straße. Zeit Online. www.zeit.de/digital/mobil/2012-09/google-autonome-autos (2012). Zugriffen: 30. September 2014
32. Schaefer, S.: Talk Back: Should California allow self-driving cars? Los Angeles Times. latimes-blogs.latimes.com/lanow/2012/09/talk-back-california-self-driving-cars.html (2012). Zugriffen: 30. September 2014
33. Anonymous.: Google’s self-driving cars get license for test drive in Nevada. New York Daily News. www.nydailynews.com/news/national/google-self-driving-cars-license-test-drive-nevada-article-1.1073991 (2012). Zugriffen: 30. September 2014
34. Cain Miller, C.: With a Push From Google, California Legalizes Driverless Cars. New York Times. bits.blogs.nytimes.com/2012/09/25/with-a-push-from-google-california-legalizes-driverless-cars/ (2012). Zugriffen: 30. September 2014
35. Temple, J.: Calif. gives driverless cars go-ahead. San Francisco Chronicle. www.sfgate.com/technology/dotcommentary/article/Calif-gives-driverless-cars-go-ahead-3894339.php#page-1 (2012). Zugriffen: 30. September 2014
36. Neil, D.: Who’s Behind the Wheel? Nobody. The Wall Street Journal. online.wsj.com/article/SB10000872396390443524904577651552635911824.html?KEYWORDS=autonomous+driving# (2012). Zugriffen: 30. September 2014

37. Kolawole, E.: A win for Google's driverless car: Calif. governor signs a bill regulating autonomous vehicles, Washington Post. www.washingtonpost.com/blogs/innovations/post/a-win-for-googles-driverless-car-calif-governor-signs-a-bill-regulating-autonomous-vehicles/2012/09/25/77bd3652-0748-11e2-a10c-fa5a255a9258_blog.html (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
38. Bohnsack, R., Marotzki, W., Meuser, M.: Hauptbegriffe Qualitativer Sozialforschung. 3. Aufl. Opladen & Farmington Hills: Verlag Barbara Budrich (2011)
39. Mayring, P.: Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. Beltz Verlag, Weinheim (2010)
40. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Innovations- und Technikanalyse. Zukunftschancen erkennen und realisieren. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2001)
41. Hey, A.J.G., Walters, P.: The New Quantum Universe. University Press, Cambridge (2003)

Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren – Analyse, Einordnung und Bewertung

30

Armin Grunwald

Inhaltsverzeichnis

30.1 Einleitung	662
30.2 Risikoanalyse und Risikoethik	663
30.2.1 Risiko – begriffliche Dimensionen	663
30.2.2 Konstellationsanalyse für Risiken	665
30.3 Gesellschaftliche Risikokonstellationen für autonomes Fahren	666
30.3.1 Risikokonstellation Unfall	666
30.3.2 Risikokonstellation Verkehrssystem	668
30.3.3 Risikokonstellation Investitionen	669
30.3.4 Risikokonstellation Arbeitsmarkt	670
30.3.5 Risikokonstellation Zugangsgerechtigkeit	671
30.3.6 Risikokonstellation Privatheit	672
30.3.7 Risikokonstellation Abhängigkeit	673
30.3.8 Zum Verhältnis von Risikokonstellation und Einführungsszenario	674
30.4 Einordnung in bisherige Risikodebatten	675
30.4.1 Erfahrungen aus den großen Risikodebatten	675
30.4.2 Schlussfolgerungen für das autonome Fahren	678
30.5 Fazit	679
30.5.1 Risikobewertung	679
30.5.2 Risiko und Akzeptanz	680
30.5.3 Elemente des gesellschaftlichen Risikomanagements	682
Literatur	684

A. Grunwald (✉)

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut
für Technologie – KIT – Campus Nord, Deutschland
armin.grunwald@kit.edu

30.1 Einleitung

Der technische Fortschritt verändert die gesellschaftlichen Risikokonstellationen. Vielfach kommt es zu deutlich höherer Sicherheit und entsprechend positiven Folgen wie Gesundheit, längerer Lebenserwartung und größerem Wohlstand. Die Neuheit technischer Innovationen bringt jedoch zwangsläufig häufig auch nicht intendierte und nicht vorhergesehene Folgen mit sich, darunter auch neue Risikotypen. Aufgabe der Technikfolgenabschätzung ist es, neben den Innovationspotenzialen auch frühzeitig mögliche Risiken zu untersuchen und dadurch zu einer vernünftigen Abwägung und Entscheidungsfindung beizutragen [10].

Das autonome Fahren stellt in vieler Hinsicht eine attraktive Innovation für die Zukunft der Mobilität dar. Mehr Sicherheit, ein Gewinn an Komfort, die Nutzung der für das Fahren benötigten Zeit für andere Zwecke und Effizienzgewinne auf Systemebene gehören zu den vielfach erwarteten Vorteilen [4]. In Systemen und Technologien autonomen Fahrens sind jedoch – wie ganz grundsätzlich bei Technik – Fehler nicht auszuschließen, die zu Unfällen mit Sach- oder Personenschäden führen können. Die zentrale Rolle von Software kann zu systemischen Risiken führen, wie aus der Internet- und Computerwelt hinlänglich bekannt. Auch an ökonomische Risiken ist zu denken, z. B. für die Automobilindustrie, genauso wie an soziale Risiken etwa im privaten Bereich. Frühzeitige und umfassende Analyse und Bewertung möglicher Risiken des autonomen Fahrens sind unabdingbarer Bestandteil eines verantwortlichen Forschungs- und Innovationsprozesses und damit gleichermaßen notwendige Bedingungen einer individuellen wie auch allgemeinen gesellschaftlichen Akzeptanz. Vor diesem Hintergrund sollen in diesem Kapitel Antworten auf folgende Fragen gegeben werden, wie sie spezifisch für die Technikfolgenabschätzung sind:

- Welche spezifische gesellschaftliche Risikokonstellation liegt beim autonomen Fahren vor? Wer könnte durch welche Schäden und mit welcher Wahrscheinlichkeit betroffen sein?
- Was kann aus den bisherigen Erfahrungen mit Risikodebatten zum technischen Fortschritt für Entwicklung und Einsatz des autonomen Fahrens gelernt werden?
- Wie kann das gesellschaftliche Risiko für die Herstellung und den Betrieb von autonomen Fahrzeugen nachvollziehbar bewertet und verantwortlich organisiert werden?

Antworten auf diese Fragen sollen vor allem das Augenmerk auf möglicherweise problematische Entwicklungen lenken, um sie gegebenenfalls in Designentscheidungen oder Regulierungen berücksichtigen zu können, und damit zur verantwortlichen und transparenten Organisation des gesellschaftlichen Risikos beitragen.

30.2 Risikoanalyse und Risikoethik

Als Risiken bezeichnen wir mögliche Schäden, die als Folgen menschlichen Handelns und Entscheidens auftreten können. Oft sind wir aus unterschiedlichen Gründen bereit, sie in Kauf zu nehmen, z. B. weil wir das Eintreten des Schadensfalles für sehr unwahrscheinlich halten oder weil wir von der Entscheidung einen Nutzen erwarten, der größer ist als der mögliche Schaden im Falle seines Eintretens. Unter Umständen werden wir aber auch Risiken durch Entscheidungen anderer ausgesetzt, z. B. durch das Fahrverhalten anderer Autofahrer oder durch politische bzw. behördliche Entscheidungen in Standortfragen.

30.2.1 Risiko – begriffliche Dimensionen

Risiken enthalten drei zentrale semantische Elemente: das Moment der *Unsicherheit*, da das Eintreten möglicher Schäden nicht sicher ist, das Moment des *Unerwünschten*, denn Schäden sind nie willkommen, und das *soziale Moment*, weil sowohl Chancen als auch Risiken grundsätzlich verteilt sind und immer Chancen und Risiken für *bestimmte* Personen oder Gruppen sind.

Das Moment der *Unsicherheit* führt auf die erkenntnistheoretische Seite des Risikos: Was wissen wir über mögliche Schäden als Folgen unseres Handelns, und wie belastbar ist dieses Wissen? Diese Frage umfasst zwei Teilfragen:

1. Welche und wie große Schäden können als Folgen des Handelns und Entscheidens eintreten und
2. mit welcher Plausibilität oder Wahrscheinlichkeit ist mit ihrem Eintreten zu rechnen?

Zu beiden Fragen kann die Spannweite des verfügbaren Wissens von wissenschaftlich gesicherter und in Zahlen genau erfassbarer Kenntnis bis zu bloßen Vermutungen und Spekulationen reichen. Wenn sich Eintrittswahrscheinlichkeit und erwartete Schadensgröße quantitativ angeben lassen, wird ihr Produkt häufig als „objektives“ Risiko bezeichnet und z. B. in der Versicherungswirtschaft verwendet. Anderenfalls spricht man von „subjektiv“ eingeschätzten Risiken, z. B. aufgrund der Risikowahrnehmung unter bestimmten Personengruppen. Dazwischen befindet sich ein weites Feld mit vielfältigen Zwischentönen unter Plausibilitätserwägungen.

Das Moment des *Unerwünschten* ist zumindest im gesellschaftlichen Bereich semantisch untrennbar mit dem Risikobegriff verbunden: Risiken sind als mögliche Schäden per se unerwünscht.¹ Allerdings kann die Bewertung von möglichen Folgen des Handelns als Risiko oder als Chance umstritten sein [1]. Ein Beispiel ist, ob die Grüne Gentechnik

¹ In anderen Bereichen ist das nicht immer so. Beispielsweise gilt Risikofreudigkeit in manchen Führungspositionen als Stärke, und in Freizeitbeschäftigungen wie bei Computerspielen oder im Sport wird oft bewusst das Risiko gesucht.

vorrangig als Chance zur Sicherung der Welternährung oder als Risiko für Mensch und Umwelt gesehen wird. Die Einschätzung hängt von der erwarteten oder vermuteten Betroffenheit von den Folgen ab, was in Kombination mit der Unsicherheit dieser Folgen Freiraum für Interpretationen lässt – und damit zu Kontroversen geradezu einlädt.

Schließlich haben Risiken also eine *soziale Dimension*: Sie sind immer Risiken für jemanden. Häufig sind Chancen und Risiken auf verschiedene Personengruppen unterschiedlich verteilt. Im Extremfall sind die Nutznießenden von möglichen Schäden gar nicht betroffen, während die Träger der Risiken nicht an den erwarteten Chancen teilhaben. Es darf also bei Abwägungen von Chancen und Risiken nicht nur nach einer abstrakten Methode wie etwa der Kosten-Nutzen-Analyse auf volkswirtschaftlicher Ebene vorgegangen werden, sondern es muss auch gefragt werden, wer von den Chancen und Risiken wie betroffen ist und ob die Verteilung gerecht ist (s. Kap. 27).

Risiken als nicht intendierte Folgen von Handlungen und Entscheidungen nehmen wir entweder in Kauf oder muten sie anderen Menschen zu [15] bzw. wir setzen Objekte (wie z. B. Elemente der natürlichen Umwelt) Risiken aus. Unter einer *gesellschaftlichen Risikokonstellation* verstehen wir das Verhältnis von Personengruppen wie Entscheidenden, Regulierenden, Stakeholdern, Betroffenen, Beratenden, Politikern und Teilhabenden angesichts von häufig kontroversen Diagnosen erwarteter Vorteile und befürchteter Risiken. Die Beschreibung von gesellschaftlichen Risikokonstellationen des autonomen Fahrens ist das Hauptziel dieses Kapitels. Zentral ist die Unterscheidung nach einer aktiven und einer passiven Konfrontation mit Risiken des autonomen Fahrens:

1. *Aktiv*: Menschen gehen in ihrem Handeln Risiken ein, sie nehmen sie individuell oder kollektiv, bewusst oder unbewusst auf sich. Wer Entscheidungen trifft und handelt, riskiert häufig etwas für sich selbst. Ein Automobilkonzern, der auf autonomes Fahren als zukünftiges Geschäftsfeld setzt und massiv investiert, riskiert eine Fehlinvestition. Den Schaden hätte vor allem der Konzern selbst (Aktionär, Belegschaft).
2. *Passiv*: Menschen werden Risiken durch Entscheidungen anderer Menschen ausgesetzt. Die Betroffenen sind andere als die Entscheidenden. Ein riskant fahrender Autofahrer gefährdet neben seiner eigenen Gesundheit auch Leben und Gesundheit anderer.

Zwischen diesen Extremen lassen sich analytisch folgende Risikostufen unterscheiden:

1. *Risiken, über deren Eingehen individuell entschieden werden kann* wie Motorradfahren, Risikosportarten oder vielleicht zukünftig eine Urlaubsreise in den Weltraum;
2. *zugemutete Risiken, denen individuell relativ einfach ausgewichen werden kann* wie z. B. mögliche gesundheitliche Risiken durch Nahrungsmittelzusätze, die im Falle entsprechender Kennzeichnung durch den Kauf anderer Lebensmittel umgangen werden können;
3. *zugemutete Risiken, denen man nur mit erheblichem Aufwand ausweichen kann*, z. B. im Fall von Standortentscheidungen von Müllverbrennungsanlagen, radioaktiven

Endlagern oder Chemiefabriken – man kann ja theoretisch einen anderen Wohnort suchen, jedoch in der Regel nur unter erheblichen Belastungen; und

4. *zugemutete Risiken ohne Ausweichmöglichkeit* wie Ozonloch, schleichende Grundwasserverschmutzung, Degradierung von Böden, Akkumulation von Schadstoffen in der Nahrungsmittelkette, Lärm, Feinstaubbelastung etc.

Die zentrale risikoethische Frage ist, unter welchen Bedingungen das Eingehen von Risiken (im aktiven Fall) bzw. ihre Zumutung (im passiven Fall) gerechtfertigt werden kann [11]. Häufig wird zwischen der faktischen *Akzeptanz* von Risiken und der normativ erwarteten *Akzeptanz*, der sogenannten *Akzeptabilität*, unterschieden [8]. Während die Akzeptanz im individuellen Ermessen liegt, wirft die Akzeptabilität ethische Fragen auf: Warum und unter welchen Bedingungen darf man andere Menschen Risiken aussetzen (s. Kap. 4)? Verschärft stellt sich diese Frage, wenn die möglicherweise Betroffenen von den Risiken weder in Kenntnis gesetzt wurden noch ihre Zustimmung erklären konnten, z. B. im Fall von Risiken für zukünftige Generationen. Aufgabe der Risikoethik [11] ist die normative Beurteilung der Akzeptabilität und Verantwortbarkeit von Risiken in Ansehung der empirischen Erkenntnisse über Schadensart, Schadensgröße, Eintrittswahrscheinlichkeit und Resilienz (Widerstandsfähigkeit) und bezogen auf eine spezifische Risikokonstellation.²

30.2.2 Konstellationsanalyse für Risiken

Also sind verbreitete Fragen des Typs, wie groß das Risiko bestimmter Maßnahmen oder neuer Technologien sei, zu pauschal und verdecken die vielfältigen Differenzierungen. Eine adäquate und sorgfältige Diskussion von Risiken muss kontextbezogen und differenzierend vorgehen und soll in Bezug auf das autonome Fahren folgende Fragen so weit wie möglich beantworten:

- Für wen können Schäden auftreten, welche Personengruppen können gefährdet werden oder müssten möglicherweise Nachteile erleiden?
- Wie sind mögliche Risiken auf Personengruppen verteilt? Sind die Träger der Risiken andere Gruppen als die Nutzer der Vorteile des autonomen Fahrens?
- Wer sind jeweils die Entscheider? Befinden sie über selbst einzugehende Risiken, oder setzen sie andere Menschen Risiken aus?
- Welche Arten von Schäden sind vorstellbar (Gesundheit/Leben von Menschen, Sachschäden, Arbeitsplatzeffekte, Reputation von Unternehmen etc.)?
- Mit welcher Plausibilität oder Wahrscheinlichkeit ist mit dem Eintreten dieser Risiken zu rechnen? Wovon hängt ihr Eintreten ab?

² Die Ergebnisse von Fraedrich und Lenz [6] zeigen, dass potenzielle Nutzerinnen und Nutzer sich nicht nur Gedanken um individuelle, sondern auch um gesellschaftliche Risiken machen.

- Wie groß ist die räumliche und zeitliche Reichweite möglicher Risiken des autonomen Fahrens? Gibt es indirekte Risiken, z. B. über systemische Effekte?
- Welche Akteure sind an der Risikoanalyse, der Risikokommunikation und der Bewertung der Risiken beteiligt, und welche Perspektiven bringen sie ein?
- Was wissen wir über diese Konstellationen, mit welcher Verlässlichkeit wissen wir dies, welche Unsicherheiten sind involviert, und welche sind möglicherweise nicht eliminierbar?

Auf diese Weise wird das *abstrakte* Risiko in eine mehr oder weniger große Vielzahl von klar angebbaren Risiken in präzisen Konstellationen zerlegt, über deren Legitimier- und Verantwortbarkeit dann einzeln und konkret gesprochen werden kann. Es werden mögliche gesellschaftliche Risiken des autonomen Fahrens „vermessen“ – man könnte sagen, dass eine „Landkarte“ dieser Risiken entsteht, die einen ersten Schritt zum Verständnis der Gesamtrisikosituation in diesem Feld bildet. Unterschiedliche Konstellationen involvieren unterschiedliche Legitimationserwartungen und verschiedene ethische Aspekte, z. B. im Hinblick auf Informations- und Mitbestimmungsrechte [11], [15], aber auch unterschiedliche Maßnahmen im gesellschaftlichen Umgang mit diesen Risiken.

30.3 Gesellschaftliche Risikokonstellationen für autonomes Fahren

Gesellschaftliche Risikokonstellationen für autonomes Fahren umfassen unterschiedliche Aspekte möglicher Schäden und Nachteile, unterschiedliche soziale Dimensionen und verschiedene Grade der Plausibilität des Eintretens möglicher Schäden.

30.3.1 Risikokonstellation Unfall

Zu den vom autonomen Fahren erwarteten Vorteilen gehört eine starke Verringerung der Zahl der Verkehrsunfälle und der damit verbundenen Schäden für Leben, Gesundheit und Werte [4] (s. Kap. 17). Diese Reduktion ist ein starkes ethisches Anliegen [3]. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass es aufgrund technologischer Mängel oder in Situationen, auf die die Technologie nicht vorbereitet ist, zu Unfällen kommen kann, die spezifisch für autonomes Fahren sind und die vermutlich mit einem menschlichen Fahrer nicht eingetreten wären. Ein Beispiel hierfür könnten unvorhergesehene und von der Automatik nicht handhabbare Situationen beim Valet-Parken (s. Kap. 2) sein. Auch wenn es hierbei nur zu Blechschaden käme, wäre eine klare rechtliche und finanzielle Nachbearbeitung erforderlich. Diese wäre umso komplexer, je weitreichender die Unfallfolgen wären, z. B. im Falle eines schweren Unfalls mit einem automatischen Autobahnpiloten (s. Kap. 2).

Mit Autounfällen sind wir aus dem seit über hundert Jahren etablierten Straßenverkehr sehr gut vertraut. Sie involvieren nur ein oder wenige Fahrzeuge, führen zu Schäden bei

einer begrenzten Anzahl von Menschen und haben ökonomisch begrenzte Auswirkungen. Für diesen Risikotypus kleinräumiger Unfälle ist ein umfangreiches und ausgereiftes System aus Rettungskräften, Unfallmedizin, Haftungsrecht und Versicherungen etabliert. Individuelle Unfälle verursacht durch autonome Fahrzeuge können voraussichtlich weitgehend innerhalb des bestehenden Systems behandelt werden. Allerdings ist die erforderliche Weiterentwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen keine triviale Aufgabe (vgl. [7]).

Unfallrisiken dieser Art sind zum einen die Nutzerinnen und Nutzer autonomer Fahrzeuge *als Insassen* ausgesetzt. Dabei entscheiden sie selbst, ob sie sich diesen Risiken aussetzen wollen oder nicht, also durch Nutzung eines autonomen Fahrzeugs oder durch Verzicht. Durch Unfallrisiken des autonomen Fahrens können aber auch andere Verkehrsteilnehmer und -teilnehmerinnen gefährdet werden, selbstverständlich auch solche, die sich nicht am autonomen Fahren beteiligen. Diesen Risiken kann man sich theoretisch dadurch entziehen, dass man nicht am Straßenverkehr teilnimmt – das wäre jedoch mit erheblichen Einschränkungen verbunden. Von daher handelt es sich beim Umgang mit Risiken des autonomen Fahrens um ein komplexes Aushandlungs- und Regulierungsthema (s. Kap. 25), in dem nicht nur das Markt-, sprich Kaufverhalten, entscheidend, sondern auch Gemeinwohlfragen wie eine mögliche Gefährdung anderer bzw. deren Schutz zu thematisieren sind. Hierfür bedarf es demokratisch und rechtlich abgesicherter Verfahren (Zulassungsverfahren, Behörden, Überprüfungen, Straßenverkehrsordnung, Produkthaftung etc.).

Diese Risiken und auch ihre komplizierte Verteilung sind nicht neu, sondern als tägliche Praxis im Straßenverkehr omnipräsent und gesellschaftlich auch akzeptiert. Dass beispielsweise gegenwärtig in Deutschland jährlich über 3000 Verkehrstote zu beklagen sind, führt nicht zu Protesten, Ablehnung des Autoverkehrs oder massivem Druck zu Veränderungen. Letzteres war anders in den frühen 1970er-Jahren, als es allein in Westdeutschland bei nur etwa einem Zehntel des heutigen Verkehrsaufkommens zu über 20.000 Verkehrstoten jährlich kam. Es wurden Maßnahmen ergriffen, vor allem zur Steigerung passiver Sicherheit, die zu einer deutlichen Verringerung dieser Todesraten geführt haben. Entscheidend für einen gesellschaftlichen Risikovergleich des bisherigen Systems mit einem zukünftigen System unter Einbezug des autonomen Fahrens wird sein, dass die Gesamtzahl der Verkehrsunfälle und der dadurch bedingten Schäden deutlich reduziert wird (s. Kap. 17 und Kap. 21). Die Tatsache, dass das autonome Fahren kaum schlagartig das heutige System ablösen wird, sondern voraussichtlich allmählich in das Verkehrssystem integriert werden wird, ist vor diesem Hintergrund ambivalent. Denn einerseits sind Mischsysteme mit menschlichen Fahrern und autonom geführten Fahrzeugen vermutlich von einer erheblich höheren Komplexität und Unvorhersehbarkeit als ein komplett auf autonomes Fahren umgestelltes System. Andererseits jedoch bietet die allmähliche Durchdringung des Verkehrssystems die Chance des Lernens aus eingetretenen Schadensfällen mit der Möglichkeit der Verbesserung. Dem Monitoring der Schadensfälle und der Ursachenanalyse kommt dabei höchste Bedeutung zu (s. Kap. 21).

Wenn die Erwartung zutrifft, dass menschenverursachte Unfälle durch autonomes Fahren stark zurückgehen, wird dem Haftungsrecht zusätzliche Bedeutung zuwachsen,

denn dann steigt der Anteil (nicht unbedingt die absolute Zahl) der technikverursachten Unfälle.³ Während heute die Verursacher zumeist Menschen sind und daher die Haftpflichtversicherungen die entstandenen Schäden ausgleichen, würde bei durch autonome Fahrzeuge verursachten Unfällen die Betreiberhaftung des Fahrzeughalters oder die Produkthaftung der Hersteller greifen (s. Kap. 26; vgl. auch [4], [7]).

30.3.2 Risikokonstellation Verkehrssystem

Auf der Systemebene verspricht das autonome Fahren mehr Effizienz, eine Verringerung von Staus und eine (vermutlich jedoch nur geringfügig, vgl. [4], [13]), bessere Umweltbilanz (s. Kap. 16). Im traditionellen Verkehrssystem entstehen systemische Effekte und damit auch mögliche Risiken vor allem durch die verfügbare Verkehrsinfrastruktur und ihre Engpässe in Verbindung mit dem individuellen Fahrverhalten sowie dem Verkehrsaufkommen. Einzelne Situationen wie schwere Unfälle oder Baustellen können zu systemischen Effekten wie Staus führen. Das autonome Fahren fügt den möglichen Ursachen für systemische Effekte eine weitere hinzu: die zugrunde liegende Technologie. Im Folgenden wird nur der Fall betrachtet, dass die autonomen Fahrzeuge nicht bordautonom, sondern auf eine Internetverbindung angewiesen sind.

Durch die Steuerungssoftware und die Angewiesenheit auf das Internet (z. B. im Rahmen eines „Internet der Dinge“) könnten neue Effekte hervorgerufen werden (s. Kap. 24). Während in der bisherigen Autowelt die Fahrzeuge mehr oder weniger unabhängig voneinander bedient werden und sich Massenphänomene nur emergent durch das ungeplante Zusammenwirken der vielen individuell geführten Fahrzeuge ergeben, wird der autonom geführte Verkehr zu einem gewissen Anteil durch Leitzentralen und Vernetzung verbunden sein, z. B. um den Verkehr optimal durch miteinander verbundene Autobahnpielen (s. Kap. 2) zu lenken. Die Steuerung einer großen Zahl von Fahrzeugen wird voraussichtlich durch eine der Grundstruktur nach identische Software erfolgen, weil Komplexität und Firmenkonzentration vermutlich die Zahl von Zulieferern stark begrenzen werden. Jedenfalls theoretisch könnte es dadurch zu simultanem Ausfall oder zu simultanem Fehlverhalten einer großen Zahl von Fahrzeugen kommen, basierend auf dem gleichen Softwareproblem. Diese Probleme wären dann nicht mehr, wie bei den o. g. Unfällen, räumlich, zeitlich und in der Schadensgröße überschaubar, sondern könnten volkswirtschaftlich relevante Dimensionen annehmen.

Insofern autonome Fahrzeuge über das Internet oder andere Technologien miteinander vernetzt sind, kann das System autonomen Fahrens als ein koordiniertes Megasystem angesehen werden. Dessen Komplexität wäre extrem hoch, vor allem auch weil es menschlich bedienten Verkehr integrieren müsste – die Musterkonstellation für schlecht oder möglicherweise gar nicht antizipierbare systemische Risiken, in denen sich Risiken komplexer

³ Übrigens wäre davon auch ein wesentliches Geschäft der Versicherungsbranche betroffen, die Pkw-Haftpflicht.

Technik und Software mit unvorhergesehenem menschlichem Handeln zu unerwarteten Systemproblemen aggregieren könnten [15].

Ein ganz anders gelagertes Systemproblem könnte, wiederum nur für den Fall nicht bordautonomer, sondern vernetzter Fahrzeuge, ein versteckter Zentralismus und eine damit verbundene Konzentration von Macht sein. Da die Optimierung auf Systemebene nur über überregionale Leitzentralen erfolgen kann (s. Kap. 24), ist – bei aller Dezentralität auf Seiten der Nutzer – eine gewisse Zentralisierung auf der Steuerungs- und Managementebene wohl unverzichtbar. Hier könnte die Sorge erwachsen, dass durch von der Technologie erzeugte Notwendigkeiten möglicherweise problematische gesellschaftliche Folgen eintreten könnten: ein zentral gesteuertes Verkehrssystem als Vorbote einer zentralistischen Gesellschaft, deren Lebensnerv eine „Megainfrastruktur“ wäre, die sich einer demokratischen Kontrolle entzöge. Dies ist jedoch kein absehbares gesellschaftliches Risiko des autonomen Fahrens und schon gar keine notwendig damit verbundene Entwicklung. Vielmehr handelt es sich um eine Befürchtung der Art, dass man auf diese mögliche problematische Entwicklung in der Etablierung des autonomen Fahrens kritisch achten muss, um gegebenenfalls gegensteuern zu können.

In all diesen Feldern bilden die Entscheidenden ein komplexes Geflecht aus Automobilkonzernen, Softwareproduzenten, politischen Regulierern und Behörden mit verteilten Verantwortlichkeiten. Möglicherweise kommen auch neue Akteure hinzu, deren Rollen heute nicht absehbar sind. Entscheidende und Betroffene fallen zu einem großen Teil auseinander. Und da es für Verkehrsteilnehmer und -teilnehmerinnen oder auch andere Bürgerinnen und Bürger praktisch keine Möglichkeit gäbe, solchen Risiken auszuweichen, ist über diese Dinge gesellschaftsweit eine offene Debatte zu führen, um die Entwicklung sorgfältig zu beobachten und zu bewerten sowie gegebenenfalls politische oder regulatorische Maßnahmen einzuleiten.

30.3.3 Risikokonstellation Investitionen

Erforschung und Entwicklung von Technologien des autonomen Fahrens sind extrem aufwendig und damit entsprechend kostenintensiv. Zulieferer und Automobilkonzerne investieren bereits gegenwärtig, und bis zu einer möglichen Einführung des autonomen Fahrens wären weitere erhebliche Investitionen erforderlich. Wie bei anderen Investitionen besteht auch hier das betriebliche Risiko, dass der *Return on Investment* nicht in der erwarteten Größenordnung oder nicht im erwarteten Zeitraum kommt, weil autonomes Fahren sich nicht in größerem Umfang durchsetzt, aus welchen Gründen auch immer. Auf der anderen Seite besteht bei einem Verzicht auf diese Investitionen das Risiko, dass Konkurrenten auf autonomes Fahren setzen und im Erfolgsfall erhebliche Steigerungen ihres Marktanteils verzeichnen. Hier müssen also strategische Unternehmensentscheidungen unter Abwägung der unterschiedlichen Risiken getroffen werden.

Dies ist zunächst ein Standardfall der Unternehmensführung und eine klassische Aufgabe des Managements. Aufgrund der Größenordnung der zu tätigenen Investitionen und des

für das autonome Fahren benötigten langen Atem haben diesbezügliche Entscheidungen weit in die Zukunft reichende Folgen. Betroffen im Falle von Fehlentscheidungen wären zunächst die Aktionäre und die Belegschaft der jeweiligen Unternehmen, im Falle dadurch ausgelöster größerer Krisen auch die Volkswirtschaft, z. B. in Deutschland mit seiner starken Abhängigkeit von der Automobilindustrie. Die Größe der ökonomischen Herausforderung kann es geraten erscheinen lassen, auch in einer prinzipiellen Wettbewerbssituation strategische Koalitionen für eine gemeinsame Basistechnologieentwicklung einzugehen.

Auch nach erfolgreicher Markteinführung kann es zu Pannen oder auch durch die Technologie verursachten Systemeffekten (s. Abschn. 30.3.2) kommen, welche sich zu einem erheblichen Risiko für die davon betroffenen Marken auswachsen können (s. Kap. 21 und Kap. 28). Ein in diesem Zusammenhang eigens zu erwähnender Risikofaktor ist die Komplexität der für autonomes Fahren erforderlichen Software. Komplexe Software lässt sich bekanntlich nicht vollständig testen, sodass in der Nutzungspraxis unerwartete Probleme auftreten können (zur Testbarkeit und Absicherung des Systems s. Kap. 21). Die Nutzung ist in diesem Sinne auch nur eine weitere Testphase, die Nutzenden sind auch Testende. Dies ist bereits heute auch in der Autowelt ein Stück weit der Fall, sind doch Softwareprobleme ein relativ häufiger Grund für Pannen. Ob die Autofahrerinnen und Autofahrer sich in einem noch stärkeren Sinne als „Testpersonen“ einsetzen lassen, ist eine offene Frage. Diese Bereitschaft dürfte in sicherheitsrelevanten Fragen kaum vorhanden sein. Wenn ein Computer wegen eines Softwarefehlers abstürzt, ist das ärgerlich. Wenn ein autonomes Fahrzeug wegen eines Softwarefehlers einen Unfall verursacht, ist das nicht akzeptabel. In einem solchen Fall ist – anders als bei „normalen“ Unfällen – eine erhebliche massenmediale Aufmerksamkeit zu erwarten.

Insbesondere durch die Macht der Bilder und deren massenmediale Verbreitung können derartige Vorfälle eine erhebliche Wirkung sogar dann haben, wenn es sich um leicht korrigierbare Phänomene handelt und die Folgen nicht dramatisch waren. Auf diese Weise ist beispielsweise das Wort „Elchtest“ durch die Publikation eines Vorfalles auf einer Teststrecke bis heute sprichwörtlich geworden. Ein anderes Beispiel ist die Geschichte des längerfristigen Reputationsverlustes von Audi auf dem amerikanischen Markt aufgrund eines Berichts in den US-Medien 1986 (s. Kap. 28). Unabhängig von der Schwere der Panne drohen auf diesem Wege Reputationsverlust und damit ökonomische Risiken. Diese drohen auch durch mögliche Massen-Rückrufaktionen, die schon für sich eine ökonomische Belastung darstellen, die aber vermutlich durch den Reputationsverlust noch überwogen wird. Die Wahrscheinlichkeit derartiger Entwicklungen steigt mit der Komplexität der benötigten Software, die sich auf diese Weise als zentraler Aspekt der Risiken des autonomen Fahrens herausstellt.

30.3.4 Risikokonstellation Arbeitsmarkt

Technische und sozio-technische Umbrüche haben üblicherweise Folgen für den Arbeitsmarkt. Insbesondere mit der Automatisierung waren und sind Befürchtungen der Vernichtung von Arbeitsplätzen verbunden. Der Automatisierung in Produktion und Fertigung

in den 1980er-Jahren sind allein in Deutschland Millionen von Arbeitsplätzen zum Opfer gefallen, vorwiegend im Bereich einfacher mechanischer Tätigkeiten. Es war eine erhebliche gesellschaftliche Anstrengung erforderlich, um durch Qualifizierung und Umschulung wenigstens einem Teil der Betroffenen andere Tätigkeitsfelder zu ermöglichen. Gegenwärtig gibt es Befürchtungen, dass die nächste Welle der Automatisierung auch anspruchsvollere Tätigkeiten überflüssig machen könnte. Auf der positiven Seite stehen bei Automatisierungsschritten die Entstehung neuer Tätigkeitsfelder und Arbeitsmöglichkeiten, sodass die Gesamtbilanz nicht unbedingt negativ sein muss. Jedoch sind diese neuen Tätigkeitsfelder in der Regel nur für höher qualifizierte Mitarbeiter zugänglich.

Eine umfassende Realisierung des autonomen Fahrens hätte zweifellos Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt. Betroffen wären primär Fahrerinnen und Fahrer von Fahrzeugen, die bisher manuell bedient werden: Lastwagenfahrer, Taxifahrer, Mitarbeiter von Logistik- und Zustellunternehmen, insbesondere im Use-Case des „Vehicle on Demand“ (s. Kap. 2). Eine gar vollständig auf autonomes Fahren umgestellte Mobilitätswelt würde weitgehend ohne diese Berufe auskommen. Auf der anderen Seite könnten neue Berufsfelder in der Steuerung und Überwachung des autonomen Verkehrs entstehen, würden in Entwicklung, Test und Herstellung der entsprechenden Systeme hoch qualifizierte Mitarbeiter benötigt, vor allem in der Zulieferindustrie.

Damit ergibt sich hier ein ähnliches Spannungsfeld wie oben für die bisherigen Wellen der Automatisierung geschildert: Wegfall eher einfacher Arbeitsplätze und das Entstehen neuer, höher qualifizierter Positionen. Über das quantitative Verhältnis lässt sich aus heutiger Sicht wohl nichts aussagen. Klar ist jedoch aufgrund der hohen Zahl der möglicherweise Betroffenen, dass frühzeitig über pro-aktive Maßnahmen zum Umgang mit dieser Entwicklung nachgedacht werden muss, z. B. durch Entwicklung und Angebot von Qualifizierungsmaßnahmen. Da davon auszugehen ist, dass die Integration des autonomen Fahrens in das gegenwärtige Verkehrssystem allmählich erfolgt und weil Erfahrungen aus anderen Automatisierungsvorgängen vorliegen, dürften die Voraussetzungen hier recht gut sein. Um eventuell für den Arbeitsmarkt problematische Entwicklungen frühzeitig zu erkennen, ist entsprechende Forschung und die Kooperation von Gewerkschaften, Arbeitgeber und Arbeitsagentur zur Beobachtung aktueller Entwicklungen erforderlich.

30.3.5 Risikokonstellation Zugangsgerechtigkeit

Das autonome Fahren verspricht mehr Zugangschancen für mobilitätseingeschränkte Personen, z. B. ältere Menschen. Während dies offensichtlich auf der ethischen Habenseite steht, könnte es auch zu Gerechtigkeitseinbußen kommen, die als „mögliche Schäden“ eben auch als Risiken zu bezeichnen wären. Hierzu gehören vor allem gelegentlich geäußerte Sorgen um eine Kostensteigerung individueller Mobilität durch die Kosten des autonomen Fahrens. In einem Mischsystem könnte man diesen Sorgen entgegenhalten, dass ja die Alternative des traditionellen Selbstfahrens weiter besteht und es also keine Verschlechterung geben würde.

In diesem Szenario würde sich allerdings die Frage stellen, wer von den Vorzügen des autonomen Fahrens, also vor allem Sicherheit und Komfort, überhaupt profitieren würde. Wenn das autonome Fahren nur dazu führen würde, dass alle, die sich heute chauffieren lassen können, dann auf ihre Chauffeure verzichten und dadurch auch noch trotz erhöhter Anschaffungs- und Betriebskosten autonomer Fahrzeuge in der Gesamtbilanz Kosten einsparen würden, käme dies sicher nicht einer größeren Zugangsgerechtigkeit zur Mobilität zugute. Das wäre vor allem dann nicht der Fall, wenn ein Großteil derjenigen, die heute selbst fahren, aufgrund der Kosten keinen Zugang zum autonomen Fahren hätte. Derartige im Hinblick auf Verteilungsgerechtigkeit problematische Entwicklungen wären freilich erstens nicht sehr spezifisch für das autonome Fahren, denn die gerechte Verteilung der Vorteile neuer Technologien ist eine Grundsatzfrage im technischen Fortschritt. Zweitens bliebe diese Sorge spekulativ, da zu den Kosten keine belastbaren Aussagen vorliegen.

Gerechtigkeitsprobleme könnten sich in Bezug auf die Kosten einer möglicherweise zu etablierenden neuen Infrastruktur für autonomes Fahren stellen [13], [4]. Wenn dies z. B. als öffentliche Aufgabe gesehen und über Steuergelder finanziert würde, würden auch Nichtnutzer das autonome Fahren mitfinanzieren. Wenn die Kosten auf alle Autofahrerinnen und -fahrer umgelegt würden, würden sich ebenfalls die Nichtnutzer als Subventionierende des autonomen Fahrens sehen. Je nachdem wie hoch die Infrastrukturkosten und damit die Belastungen wären, könnte dies zu Gerechtigkeitsdebatten über die Verteilung der Kosten Anlass geben.

30.3.6 Risikokonstellation Privatheit

Bereits heute liefern moderne Automobile eine Fülle von Daten und hinterlassen elektronische Spuren, z. B. durch Verwenden einer Navigationshilfe oder durch an die Hersteller übermittelte Daten. Falls autonome Fahrzeuge nicht bordautonom wären, sondern ständig vernetzt sein müssten, würden die elektronischen Spuren ein vollständiges Bewegungsprofil ergeben [13]. Nun müssen Bewegungsprofile von Fahrzeugen nicht identisch sein mit Bewegungsprofilen von Nutzerinnen und Nutzern. Bei Vehicles-on-Demand (s. Kap. 2) ist es natürlich vorstellbar, dass diese anonym genutzt werden könnten, wenn Bestellung und Bezahlung anonym erfolgen – was jedoch angesichts der gegenwärtigen Entwicklung hin zu elektronischen Systemen eher inkonsequent erscheint.

Bewegungsprofile sind eine wertvolle Information für Geheimdienste, die etwa die räumliche Bewegung von Regimegegner verfolgen könnten, aber auch für Unternehmen, die z. B. daraus Profile für zielgenaue Werbung ableiten könnten. Angesichts der zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung von immer mehr Bereichen des gesellschaftlichen und individuellen Lebens stellt die spezifisch zusätzliche Digitalisierung im autonomen Fahren vermutlich nur ein Element neben vielen anderen dar. Das Problem – bereits heute wird immer wieder von einem Ende der Privatheit gesprochen – ist um ein Vielfaches größer, wie dies die aktuellen Debatten um NSA, Industrie 4.0 und Big Data zeigen. Das Entstehen einer konvergierenden Megainfrastruktur aus Verkehrssystem, Informations-

versorgung, Kommunikationssystemen, Energiesystemen und möglicherweise weiteren, bisher getrennt funktionierenden Infrastrukturen stellt eine der großen Herausforderungen der nächsten Jahre oder sogar Jahrzehnte dar. Es wird darum gehen, Grenzen zwischen Privatheit und Öffentlichkeit neu zu definieren und die Entscheidungen dann auch umzusetzen. Dies muss auf der politischen Bühne erfolgen und ist von demokratietheoretischer Bedeutung, da die absolute Transparenz nur Kehrseite eines totalitären Systems wäre. Das autonome Fahren ist in dieser Auseinandersetzung vermutlich von nur geringer spezifischer Bedeutung.

30.3.7 Risikokonstellation Abhängigkeit

Moderne Gesellschaften sind zunehmend vom reibungslosen Funktionieren von Technik abhängig. Dies beginnt mit der Abhängigkeit vom individuellen Computer und Auto und reicht bis hin zur vollständigen Abhängigkeit von einer funktionierenden Energieversorgung und dem Funktionieren der weltweiten Datenkommunikationsnetze und Datenverarbeitung als Voraussetzung der globalen Wirtschaft. Komplexer werdende Infrastrukturen wie z. B. die Elektrizitätsversorgung, die durch erneuerbare Energieträger immer stärker mit fluktuierendem Angebot umgehen muss, beinhalten verstärkt „systemische Risiken“ [15], welche aus kleinen Ursachen durch komplexe Verkettungen und positive Rückkopplungen zu Systeminstabilitäten führen können. Diese immer häufiger thematisierte Anfälligkeit gegenüber technischem Versagen und zufälligen Ereignissen, aber auch gegenüber terroristischen Angriffen auf die technischen Lebensnerven der Gesellschaft (z. B. in Form eines Cyber-Terrorismus als Angriff auf das informationstechnische Rückgrat der globalisierten Ökonomie), stellt eine nicht intendierte und unerwünschte, gleichwohl unvermeidliche Folge der beschleunigten Technisierung dar [10]. Hierbei handelt es sich um Risiken, die sich mehr oder weniger schleichend einstellen, die vielfach nicht bewusst unter expliziten Verfahren einer Risiko-Chance-Abwägung in Kauf genommen werden, sondern die möglicherweise erst dann ins öffentliche Bewusstsein treten, wenn die Abhängigkeit fühlbar wird, etwa bei einem längerfristigen Blackout der Stromversorgung, der praktisch alles gesellschaftliche Leben lahm legen würde [12].

Bei einer weitgehenden Umstellung der Mobilität auf autonomes Fahren würde selbstverständlich ein großer Teil der gesellschaftlichen Mobilitätsbedürfnisse vom Funktionieren dieses Systems abhängen. Ein Zusammenbruch wäre dann noch tragbar, wenn es genügend Menschen gibt, die die Fahrzeuge auch manuell bedienen können. In einem System, das etwa beim individuellen Personenverkehr eine Umschaltung von autonom auf manuell erlaubt, wäre dies kein Problem. Falls jedoch beispielsweise weite Teile der Logistik und des Güterverkehrs auf autonome Systeme umgestellt würden, wäre schwer vorstellbar, für den Fall eines länger andauernden Komplettausfalls des Systems ein umfangreiches Fahrpersonal vorzuhalten, zumal die Fahrzeuge dann auch so ausgestattet sein müssten, dass sie manuell betrieben werden können. Auch wenn wesentliche Logistikketten durch einen Systemausfall für längere Zeit unterbrochen würden, könnte es recht

schnell zu Engpässen kommen, sowohl in der Versorgung der Bevölkerung als auch, um die Produktion in der Industrie aufrechtzuerhalten [12]. Dieser Risikotyp ist nichts Neues: Die seit der Energiewende häufiger thematisierte massive Abhängigkeit von einer verlässlich funktionierenden Stromversorgung, aber auch die Abhängigkeit der Weltwirtschaft vom Internet sind strukturell ähnlich.

Eine andere Form der Abhängigkeit durch autonomes Fahren kann auf individueller Ebene durch das Verlernen von Kompetenzen entstehen. Eine starke Nutzung autonomer Fahrzeuge würde den Verlust von Fahrpraxis bedeuten. Werden die Fahrzeuge dann manuell bedient, z. B. am Wochenende oder im Urlaub, kann sich die verminderte Fahrpraxis – sozusagen eine Abhängigkeit von autonom geführten Fahrzeugen – in einer verminderten Kompetenz, z. B. zur Beherrschung von unerwarteten Situationen, niederschlagen. Im Falle eines Totalausfalls des Systems wäre auf den Verkehrswegen auf einmal eine große Zahl von manuell geführten Fahrzeugen unterwegs – möglicherweise wäre dann auch die verringerte Kompetenz der Lenker problematisch. Zusätzlich würde es vermutlich zu erheblichen Engpässen und Staus kommen, wenn die erwarteten Effizienzgewinne auf Systemebene (s. Abschn. 30.3.2) plötzlich verschwinden.

Schließlich wächst mit der weiteren Digitalisierung und der Übergabe von Autonomie an technische Systeme die gesellschaftliche Anfälligkeit gegenüber intendierten Störungen und externen Angriffen. Durch Terroristen, Psychopathen oder auch in militärischen Zusammenhängen (*Cyber War*) wäre dann auch das autonome Fahren betroffen. So könnten die Leitzentralen „gehackt“ werden, es könnte Störsoftware eingebracht oder ein Systemzusammenbruch ausgelöst werden. Abwehrmaßnahmen sind selbstverständlich notwendig und auch technisch möglich; hier kommt es jedoch bekanntermaßen zu dem Hase-Igel-Problem. Aber auch das ist ein Problem, das nicht spezifisch mit dem autonomen Fahren verknüpft, sondern aus der Internetwelt bekannt und z. B. auch bereits in der Energieversorgung angekommen ist.

30.3.8 Zum Verhältnis von Risikokonstellation und Einführungsszenario

Die geschilderten Risikokonstellationen beruhen auf qualitativen und explorativen Gedanken aus der heutigen Mobilitätswelt. Damit haben sie eine gewisse Plausibilität, jedoch ebenfalls spekulative Anteile. Sie dürfen nicht als Prognosen verstanden werden, sondern sind eher Markposten, die auf dem Weg hin zur Erforschung, Entwicklung und Einführung des autonomen Fahrens berücksichtigt werden sollen. Prognostisch können sie bereits deshalb nicht sein, weil das zukünftige Eintreten bestimmter Risikokonstellationen vom Einführungsszenario des autonomen Fahrens und seiner spezifischen Ausprägung abhängig sein wird – und beide Elemente sind heute nicht bekannt. Ob beispielsweise ein bordautonomes Fahren realisiert werden wird oder ob autonome Fahrzeuge ständig mit dem Internet und Leitzentralen vernetzt sein müssen, wird stark die Ausprägung der Risikokonstellation „Privatheit“ beeinflussen.

Die gesellschaftliche Risikowahrnehmung wird insbesondere stark davon abhängen, wie das autonome Fahren eingeführt wird. Wenn dies auf dem Wege einer allmählichen Automatisierung des Fahrens erfolgt, besteht durch die Möglichkeit eines allmählichen Lernens aus den jeweils bisher gemachten Erfahrungen ein nur geringes Risiko einer „Skandalisierung“ des autonomen Fahrens als Hochrisikotechnologie für Insassen oder externe Betroffene. Schritte auf dem Weg zur weiteren Automatisierung wie Traffic Jam Assist, automatisiertes Valet-Parken oder Automated Highway Cruising (s. Kap. 2), deren Einführung in den nächsten Jahren erwartbar erscheint (s. Kap. 10), würden vermutlich kaum eine erhöhte Risikobeobachtung erzeugen, weil sie auf dem inkrementellen Weg des technischen Fortschritts als quasi natürliche Weiterentwicklungen erscheinen.

Anders z.B. als beim Einschalten eines Kernreaktors verläuft der Prozess der zunehmenden Fahrerassistenz in Richtung auf mehr Automatisierung des Fahrens bislang allmählich. Das Automatikgetriebe ist bereits einige Jahrzehnte alt, mit ASB, ESP und Einparkhilfen sind wir vertraut, und weitere Schritte auf dem Weg zu einem immer stärker assistierten Fahren sind in der Entwicklung. Eine inkrementelle Einführung erlaubt ein Maximalmaß des Lernens und würde auch die allmähliche Adaptation etwa des Arbeitsmarktes oder der Anforderungen an Privatheit (s. Abschn. 30.3.6) erlauben.

In eher revolutionären Einföhrungsszenarien (s. Kap. 10) würden sich andere und wohl auch größere Herausforderungen an die prospektive Analyse und die Wahrnehmung von Risiken stellen. Die öffentliche Wahrnehmung würde dann besonders sensibel auf Unfälle oder kritische Situationen reagieren, die Gefahr einer „Skandalisierung“ wäre größer, und die Risikokonstellation „Investitionen“ (s. Abschn. 30.3.3) könnte sich für einzelne Zulieferer oder Marken zu einem realen Problem entwickeln.

30.4 Einordnung in bisherige Risikodebatten

In Deutschland und anderen industrialisierten Ländern liegen umfangreiche Erfahrungen mit Akzeptanz- und Risikodebatten aus mehreren Jahrzehnten vor. In diesem Abschnitt sollen die Lehren aus diesen vergangenen Risikokommunikationen gezogen und auf das autonome Fahren übertragen werden – insofern das aufgrund der sehr unterschiedlichen Risikokonstellationen möglich ist.

30.4.1 Erfahrungen aus den großen Risikodebatten

Kernenergie

Die Risikokonstellation der Kernenergie bestand vor allem darin, dass auf der einen Seite Entscheidende aus Politik und dann auch der Wirtschaft standen, unterstützt durch Expertinnen und Experten aus den einschlägigen Natur- und Ingenieurwissenschaften. Auf der anderen Seite befanden sich die Betroffenen, vor allem Anwohner an den Standorten für Kernkraftwerke, an der geplanten Wiederaufbereitungsanlage oder am früher geplanten

Endlager Gorleben, darüber hinaus aber auch beträchtliche und wachsende Teile der deutschen Bevölkerung.

Die Kernenergie ist eine typisch lebensweltferne Technologie. Auch wenn von dem erzeugten Strom viele profitieren, ist die Quelle des Stroms nicht sichtbar, wie die Rede-weise zeigt, dass „der Strom aus der Steckdose“ komme. Die Möglichkeit eines GAU mit katastrophalem Schadenspotenzial, wie etwa in Tschernobyl und Fukushima real geschehen, die Tatsache, dass deswegen keine Versicherungsgesellschaft bereit war und ist, die Risiken der Kernkraftwerke zu versichern, die radioaktiven Hinterlassenschaften, die für eine extrem lange Zeit Belastungen erzeugen – all dies zeigt, dass die Risikokonstellation der Kernenergie eine absolut andere als die des autonomen Fahrens ist. Nur in einem Punkt könnte gelernt werden:

Die frühe Kernenergie-debatte in Deutschland war geprägt von einer Arroganz der Expertinnen und Experten, die damals fast sämtlich Kernenergiebefürworter waren, gegenüber Kritik. Sorgen aus der Bevölkerung wurden nicht ernst genommen, sondern Kritiker wurden als irrational, vorgestrig oder unwissend dargestellt [14]. Auf diese Weise wurde Vertrauen in mehrfacher Hinsicht verspielt: Vertrauen in das Geflecht aus Experten, Wirtschaft und Politik, das hinter der Kernenergie stand, Vertrauen in das Funktionieren demokratischer Prozesse und Vertrauen in das Expertentum in diesem Feld, aber auch darüber hinaus. Man kann aus der Risikodebatte zur Kernenergie lernen, wie wichtig Vertrauen in Institutionen und Personen ist, und wie rasch dieses verspielt werden kann.

Grüne Gentechnik

Die Risikokonstellation in der Debatte zur Grünen Gentechnik ist in anderer Hinsicht interessant. Trotz einer rhetorischen Fokussierung auf Risiken, z. B. durch Freisetzung und unkontrollierte Verbreitung gentechnisch veränderter Organismen, ist das eigentliche Thema weniger die konkrete Größe dieses Risikos, sondern eher die Verteilung von Risiken und Nutzen. Denn der Endverbraucher hätte (anders als bei der Gentechnik für medizinische Zwecke) keinen ersichtlichen Nutzen aus gentechnisch veränderten Nahrungsmitteln. Bestenfalls wären die gentechnisch veränderten Nahrungsmittel nicht schlechter als die traditionell erzeugten. Der Nutzen käme vor allem den Lebensmittelkonzernen zugute. In Bezug auf mögliche gesundheitliche Risiken (z. B. Allergien) sähe es jedoch gerade anders aus: Sie würden die Nutzerinnen und Nutzer betreffen. Das ist natürlich für diese eine schlechte Bilanz: vom Nutzen ausgeschlossen, aber möglichen Risiken ausgesetzt. Diese Sicht dürfte eine plausible Erklärung für mangelnde Akzeptanz sein und die Lehre erlauben, beim autonomen Fahren nicht nur auf abstrakten Nutzen (z. B. für die Volkswirtschaft oder die Umweltbilanz) abzuheben, sondern den Nutzen für die „Endverbraucherinnen und -verbraucher“ in den Mittelpunkt zu stellen.

Ein Zweites kommt hinzu: Der Versuch der Lebensmittelkonzerne, vor allem von Monsanto, die Grüne Gentechnik mit Macht in Europa durchzusetzen, hat gerade das Misstrauen und den Widerstand beflügelt. Druck und massiver Lobbyismus führen in sensiblen Bereichen wie bei Nahrungsmitteln zur Sensibilisierung der Verbraucherinnen und Verbraucher und zu Misstrauen. Ein „Durchdrücken“ von neuen Technologien in lebens-

weltnahen Bereichen, wie es das Autofahren ja auch ist, erscheint vor diesem Hintergrund als eine in sich riskante Strategie.

Mobile Kommunikationstechnologien

Die Mobiltechnologien (Handys, mobile Internetnutzung) sind ein interessanter Fall für Technologieeinführungen, die trotz öffentlicher Risikodiskussion gelungen sind. Obwohl es seit über zehn Jahren eine lebhaftes Risikodiskussion zu elektromagnetischer Strahlung (EMF) gibt, hat dies der Akzeptanz auf der individuellen Ebene keinen Abbruch getan. Nur Standorte von Sendemasten sind immer wieder Gegenstand von Protest und Opposition. Gegen die Technologie als solche gibt es jedoch praktisch keine Opposition. Die nahe-liegende Erklärung ist, dass der Nutzen, und zwar nicht der volkswirtschaftliche, sondern der für jeden Einzelnen erfahrbare individuelle Nutzen, einfach zu überwältigend ist.

Auch die schweren und öffentlich diskutierten Risiken für Privatheit, die in den letzten Jahren anlässlich vieler Ausspähungen durch Unternehmen und Geheimdienste bekannt geworden sind, haben kaum zu einer Zurückhaltung der Verbraucherinnen und Verbraucher geführt. Mobiles Telefonieren, Online-Banking, e-Commerce und das ständige online Sein erlauben die Erstellung von verblüffend zutreffenden Profilen – was aber die Nutzerinnen und Nutzer nicht abhält, weiterhin diese Technologien anzuwenden und dauernd private Daten preiszugeben. Es ist wohl der unmittelbar erfahrbare Nutzen, der uns die Risiken auch dann akzeptieren lässt, wenn wir sie kennen und kritisieren.

Nanotechnologie

Seit dem Aufkommen einer Risikodebatte zur Nanotechnologie vor fast fünfzehn Jahren ist diese Technologie von Befürchtungen begleitet, ihr könne ein ähnliches Desaster in Bezug auf die öffentliche Wahrnehmung drohen wie der Kernenergie oder der Grünen Gentechnik. Frühe und extrem weitreichende, jedoch rein spekulative Befürchtungen in Form von Horrorszenarien wie ein Kontrollverlust des Menschen über die Technik sind jedoch aus der Debatte wieder verschwunden, ohne dass es zu diesen Effekten gekommen ist. Die Nanotechnologie wurde im Rahmen einer offenen Diskussion von den spekulativen Höhen zwischen Paradieserwartungen und apokalyptischen Befürchtungen zu einer „normalen“ Technologie, deren konkrete Vorteile sich vor allem in neuen Materialeigenschaften durch Beschichtungen oder Beimischungen von Nanopartikeln zeigen.

Aber auch hier gab es Befürchtungen einer massiven Ablehnung. Forderungen von Organisationen wie der ETC-Group oder dem BUND nach einer strengen Auslegung des Vorsorgeprinzips, etwa in Form eines Moratoriums der Verwendung von Nanopartikeln in marktgängigen Produkten wie Kosmetika oder Lebensmitteln, gelten hierbei als Indizien. Eine fundamentalistische Verhärtung der Fronten ist jedoch trotz entsprechender Szenarien nicht eingetreten. Ein Grund dürfte sein, dass die Risikokommunikation in diesem Fall ganz anders gelaufen ist als bei Atom- und Gentechnik. Während dort früher die Expertinnen und Experten häufig Sorgen und Bedenken nicht ernst genommen, sondern als irrational abqualifiziert und eine Botschaft des „Wir haben alles unter Kontrolle“ vertreten haben, war und ist die Risikodiskussion zur Nanotechnologie von Offenheit gekennzeichnet.

Wissenschaftler und Wirtschaftsvertreter haben nicht bestritten, dass es Wissensdefizite über mögliche Risiken gibt und dass Risiken so lange nicht ausgeschlossen werden können, bis die Toxikologie weiter vorangeschritten ist. Auf diese Weise wurde Vertrauen geschaffen. Man könnte es paradox formulieren: Weil auf allen Seiten offen über Nichtwissen und mögliche Risiken diskutiert wurde und wird, blieb die Debatte konstruktiv. Das weitgehende Nichtwissen über mögliche Risiken wurde als Forschungsaufgabe akzeptiert, statt zu fordern, Produkte mit Nanomaterialien nicht in den Markt zu bringen. Statt sich auf die absolute Vermeidung von Risiken zu kaprizieren (Nullrisiko), wurde Vertrauen für einen verantwortlichen Umgang mit möglichen Risiken geschaffen.

30.4.2 Schlussfolgerungen für das autonome Fahren

Das autonome Fahren wird eine lebensweltnahe Technologie sein, die mit dem Leben von Menschen so eng verbunden ist wie das heutige Autofahren. Das rückt es weit weg von der Kernenergie, während es die Lebensweltnähe gemeinsam mit der Grünen Gentechnik (über deren Einsatz in der Lebensmittelerzeugung) und dem Mobilfunk hat. Aus beiden Risikodebatten kann entnommen werden, wie zentral die Dimension des individuellen Nutzens ist. Während ein solcher vom Verzehr gentechnisch veränderter Nahrungsmittel sogar von den Befürworter kaum erwartet wurde, ist der individuelle Vorteil des mobilen Telefonierens und des mobilen Internetzugangs evident. Und sobald dieser Nutzen erkennbar groß ist, sind Menschen auch bereit, mögliche Risiken einzugehen. Das ist handlungstheoretisch absolut rational. Irrational ist es dagegen, Risiken auf sich zu nehmen, wenn der Nutzen nicht erkennbar ist oder nur anderen Akteuren (Beispiel Monsanto für die Grüne Gentechnik) zukommen würde. Dann kann eine Risikodebatte dramatische Folgen haben und beispielsweise zum K.o. für die Akzeptanz führen.

Eine andere Möglichkeit für eine solche K.o.-Situation kann die Möglichkeit eines GAU darstellen, wie er als sogenanntes „Restrisiko“ charakteristisch für die Kernenergie ist. Dieses wurde durch politische Entscheidungen verordnet, wobei kaum Mitwirkungsmöglichkeiten bestanden. Hier lag also eine weitgehend als passiv empfundene Risikosituation des Ausgeliefertseins an Entscheidungen anderer vor. Aus dieser Konstellation ist nichts direkt für das autonome Fahren zu lernen, da dieses voraussichtlich marktnah in einem vertrauten Kontext des üblichen Verkehrs eingeführt und damit von der faktischen Akzeptanz der Nutzerinnen und Nutzer abhängen würde. Zwar sind auch andere Einführungszenarien denkbar (s. Kap. 10), jedoch ist eine politische Verordnung des autonomen Fahrens kaum vorstellbar. Indirekt kann aus der Geschichte der Kernenergie nur gelernt werden, dass expertokratische Arroganz Misstrauen erzeugt. Eine offene Diskussion „auf Augenhöhe“ – das ist auch eine Lehre aus der Debatte zur Nanotechnologie – ist in einer offenen Gesellschaft eine zentrale Voraussetzung für einen konstruktiven Verlauf von Technikdebatten.

Insgesamt zeigen die Beispiele auch, dass der Vorwurf der Technikfeindlichkeit der Deutschen eine Legende ist, die sich nur an den Erfahrungen mit Kernenergie und Gentechnik festmacht. Alle empirischen Untersuchungen zeigen, dass ansonsten in einem

großen Spektrum der Technik (digitale Techniken, Unterhaltungselektronik, neue Technologien im Automobilbereich, neue Materialien etc.) die Akzeptanz sehr groß ist [1]. Dies gilt auch für einige Technologien, zu denen es durchaus intensive Risikodebatten gab oder gibt, wie z. B. Mobilfunk. Dass bei neuen Technologien heutzutage sofort Fragen nach Risiken gestellt werden, ist noch lange keine Technikfeindlichkeit, sondern Ausdruck der Erfahrung mit der Ambivalenz von Technik und des Wunsches nach möglichst umfassender Information. Vieles, was üblicherweise als Indiz für Technikfeindlichkeit genommen wird, hat mit der Technik wenig zu tun. Bei Stuttgart21 handelt es sich nicht um eine Ablehnung der Eisenbahntechnik, bei Protesten gegen neue Start- und Landebahnen an Großflughäfen nicht um eine Ablehnung der Technologie des Fliegens oder beim Protest gegen Autobahnen und Umgehungsstraßen nicht um eine Ablehnung der Technologie des Autofahrens. Sogar bei Gentechnik und Kernenergie hat die Ablehnung auch stark mit nicht-technischen Faktoren zu tun: Misstrauen in internationale Großkonzerne wie Monsanto oder in eine funktionierende Kontrolle und Überwachung (Beispiel Tebco in Japan).

30.5 Fazit

Risikomanagement muss an die jeweiligen Risikokonstellationen angepasst werden und auf den passenden Ebenen (öffentliche Debatte, rechtliche Bestimmungen, politisch legitimierte Regulierung, betriebliche Entscheidungen etc.) erfolgen. Es basiert auf der Beschreibung der Risikokonstellationen, vertiefter Risikoanalysen in den jeweiligen Feldern und einer gesellschaftlichen Risikobewertung.

30.5.1 Risikobewertung

Die gesellschaftliche Risikobewertung ist ein komplexer Prozess unter Beteiligung vieler Akteure, der teils eigendynamischen und schlecht absehbaren Entwicklungen folgt [15]. Ausgehend von Stellungnahmen besonders sichtbarer Akteure (im Fall von neuen Technologien häufig auf der einen Seite aus Wissenschaft und Wirtschaft, auf der anderen Seite aus Bürgerinitiativen und Umweltverbänden) kommt es zur allmählichen Verdichtung von Positionen und Gegenüberstellungen in den Massenmedien und der dadurch repräsentierten Öffentlichkeit. Einzelereignisse können Stimmungen kippen oder dramatisch beschleunigen wie z. B. die Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima in Bezug auf die Kernenergie. Das macht Prognosen extrem schwierig. Im Folgenden wird eine tentative Aussage zum autonomen Fahren unter Aspekten der Plausibilität und der aus vergangenen Debatten gezogenen Lehren versucht.

Zunächst ist zu beachten, dass für Risikobewertungen Vergleiche ganz wichtig sind [8], [13], [15]. Wir beurteilen neue Risikoformen dadurch, dass wir sie in Beziehung zu bekannten Risikoformen setzen. Hierzu liegt beim autonomen Fahren mit dem traditionellen Autofahren eine bekannte Risikokonstellation vor, die als zentraler Vergleichsmaßstab

herangezogen werden kann und sollte (s. Kap. 28 und auch Abschn. 30.3). Insofern in diesem Vergleich das autonome Fahren deutlich und unzweifelhaft besser abschneiden würde (also mehr Sicherheit, weniger Unfallrisiken), wäre dies ein ganz wichtiger Punkt der gesellschaftlichen Risikobewertung.

Zu bedenken ist auch, dass die Risiken des autonomen Fahrens überschaubar in mehrfacher Hinsicht erscheinen. Technikbedingte Unfälle dürften mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten, die durch eine intensive Testphase minimiert, aber nicht eliminiert werden kann. Ihre Folgen wären, anders als etwa bei der Kernenergie, sowohl in räumlicher und zeitlicher Hinsicht (vgl. Endlagerproblem hoch radioaktiver Abfälle) als auch in Bezug auf die Zahl der involvierten Menschen und die betroffenen Werte überschaubar. Eine GAU-Problematik liegt nicht vor.

Zu einem guten Teil neu ist die mit der Automatisierung des Fahrens möglicherweise verbundene digitale Vernetzung mit all den Folgen für mögliche systemische Risiken, Verletzlichkeit, Datenschutz und Überwachung. Diese werden sicher wichtige Themen einer gesellschaftlichen Debatte auch zum autonomen Fahren sein. Da jedoch diese Herausforderungen auch in einer Vielzahl anderer Handlungsfelder auftreten (zunehmend auch bereits heute bei nicht-autonomen Fahrzeugen), dürften sich daraus kaum spezifische Risikobefürchtungen zum autonomen Fahren entwickeln.

Ein Sonderfall ist die betriebliche Risikobewertung durch die Hersteller (s. Abschn. 30.3.3), sowohl was den erwarteten *Return on Investment* als auch mögliche Reputationsprobleme durch Unfälle im Betrieb beinhaltet. Die betriebliche Bewertung muss hierbei zwangsläufig mit extrem unsicheren Annahmen arbeiten, etwa über die Skandalisierungsbereitschaft von Massenmedien und über die Auswirkungen von Skandalisierungen. Hier kann es in beiden Richtungen zu Fehlwahrnehmungen kommen: übertriebene Sorge oder naive Zuversicht. Es ist jedenfalls zu erwarten, dass in einer gesellschaftlichen Perspektive mögliche Skandalisierungen nicht der Technologie des autonomen Fahrens abstrakt, sondern der jeweilig betroffenen Marke konkret angelastet würden. Das mag zwar für die betroffene Marke kein Trost sein; es weist jedoch darauf hin, dass – jedenfalls solange die Nutzen des autonomen Fahrens fraglos anerkannt sind – dieser Problemtyp sich nur auf den Wettbewerb der Hersteller untereinander, nicht aber auf das autonome Fahren als Technologie auswirken würde. Und das ist bei anderen Technologien bereits heute der Fall.

In der Gesamteinschätzung stellt sich die gesellschaftliche Risikokonstellation als tendenziell entspannt dar. Sie ist nicht zu vergleichen mit Gentechnik und Kernenergie: Es besteht keine GAU-Problematik, der Nutzen ist klar erkennbar, die Einführung erfolgt über einen Markt und nicht über Verordnung „von oben“. Und sie würde vermutlich nicht durch „Umlegen eines Schalters“ von heute auf morgen, sondern allmählich erfolgen.

30.5.2 Risiko und Akzeptanz

Akzeptanz (s. Kap. 29) kann nicht „hergestellt“ werden, wie das gelegentlich erwartet wird, sondern sie kann sich nur „einstellen“ (oder auch nicht). Dieses „sich Einstellen“ hängt von

vielen Faktoren ab, die teilweise durchaus beeinflussbar sind. Grob gesprochen, hängt die gesellschaftliche wie individuelle Akzeptanz stark von der Wahrnehmung von Nutzen wie von Risiken ab. Dabei ist entscheidend, dass die erwarteten Vorteile nicht nur abstrakte volkswirtschaftliche Daten beinhalten, sondern auch konkrete Vorteile für diejenigen darstellen, die die neuen Technologien nutzen. Hinzu kommt die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Exposition gegenüber Risiken [9]. Akzeptanz fällt üblicherweise erheblich leichter, wenn die individuellen Personen selbst die Entscheidungshoheit haben (z. B. Ski zu fahren), als wenn die Personen von externen Instanzen den Risiken ausgesetzt und damit in gewisser Weise „fremdbestimmt“ werden.

Wichtig für die Akzeptanz angesichts von Risikobefürchtungen ist auch, dass Nutzen und Risiken (einigermaßen) gerecht und nachvollziehbar verteilt sind (das war das Hauptproblem in der Gentechnikdebatte, s. Abschn. 30.4.1). Geradezu entscheidend ist, dass die relevanten Institutionen (Produzierende, Betreibende, Regulierende, Überwachungs- und Kontrollinstanzen) Vertrauen genießen und dass nicht der Eindruck eines „Durchdrückens“ zulasten der Betroffenen mit ihren Risikobefürchtungen entsteht. Dazu muss die Kommunikation über mögliche Risiken in einer offenen Atmosphäre verlaufen – nichts ist massenmedial verdächtiger als zu behaupten: Risiken gibt es nicht, und wir haben alles unter Kontrolle. Sorgen und Fragen müssen ernst genommen werden und dürfen nicht a priori als irrational vom Tisch gewischt werden. Für all dies ist frühzeitige und offene Kommunikation mit relevanten gesellschaftlichen Gruppen und in der massenmedialen Öffentlichkeit wichtig und, wo angebracht, auch im Sinne einer „partizipativen Technikgestaltung“.

Manches spricht dafür, dass für die Akzeptanz des autonomen Fahrens eher die Nutzenerwartungen als die Risikobefürchtungen entscheidend sind. Immerhin ist Autofahren eine fast vollständig akzeptierte Technologie, obwohl es in Deutschland jährlich über 3000 Verkehrstote gibt. Im Gegensatz etwa zur Kernenergie erscheinen mögliche Schadensfälle von zeitlich und räumlich begrenzter Reichweite. Andere gesellschaftliche Risiken (z. B. Überwachung, s. Abschn. 30.3.3) sind eher abstrakt, während die erwarteten Vorteile teils sehr konkret sind. Die Gegenüberstellung „abstract social gain – concrete human loss“ (s. Kap. 27) sollte daher gerade umgekehrt vorgenommen werden: abstrakte Risiken wie Abhängigkeit von komplexen Technologien oder Probleme mit dem Datenschutz versus konkrete individuelle Vorteile hinsichtlich Sicherheit und Komfort. Eine Risikofokussierung würde daher vermutlich am Kern der Herausforderung vorbeiführen: Entscheidend scheinen eher die Nutzenerwartungen zu sein.

Dies gilt natürlich nur, weil die Risikobewertung keine dramatischen Befunde ergeben hat. Vielmehr stellt die Risikokonstellation des autonomen Fahrens eher ein *business as usual* im technischen Fortschritt dar – sicher mit seinen Ambivalenzen und gesellschaftlichen Risiken, aber auch mit den Möglichkeiten, damit vernünftig und zivil umzugehen. Insbesondere die voraussichtlich allmähliche Einführung des autonomen Fahrens und die damit verbundenen Chancen des Lernens und Verbesserns in Verbindung mit der Abwesenheit von Risiken des „GAU-Typs“ relativieren die Bedeutung von Risikofragen in der weiteren Debatte zum autonomen Fahren wie z. B. zum Arbeitsmarkt oder zu Gerechtigkeitsfragen. Statt einer Risikofokussierung erscheint es angebracht, Elemente und

Optionen autonomen Fahrens als Teile attraktiver Mobilitätszukünfte mit mehr Sicherheit, mehr Effizienz, mehr Gerechtigkeit und mehr Komfort/Flexibilität anzusehen. Zwar gibt es kein Nullrisiko – das hat man aber beim bisherigen Autofahren auch nicht!

Zwei große Akzeptanzrisiken verbleiben: Das eine ist die Möglichkeit der Skandalisierung von Problemen bei Testfahrten oder von Technikversagen, möglicherweise im Kontext von Unfällen, durch massenmediale Berichterstattung (Stichwort Elchtest). Die Folgen wären schwer absehbar. Aber auch hier gilt, dass ja der Elchtest nicht Anlass gegeben hat, die Technologie des Autofahrens abzulehnen. Das Problem bestünde – vorausgesetzt die obige Einschätzung trifft zu, dass die Nutzenerwartungen für die Akzeptanz wichtiger sind als die Risikobefürchtungen – eher darin, dass der Reputationsverlust einzelne Marken treffen würde, nicht die Technologie des autonomen Fahrens insgesamt.

Die zweite große Unbekannte ist die Psychologie des Menschen. Ob und inwieweit Menschen sich, und d. h. im Ernstfall auch ihr Leben und ihre Gesundheit, autonomen Fahrzeugen anvertrauen werden, ist eine offene Frage. Akzeptanzprobleme anderer autonomer Verkehrssysteme wie von U-Bahnen oder von Shuttle-Diensten sind zwar nicht bekannt. Aber schienenengebundene Fahrzeuge werden anders wahrgenommen als Autos, z. B. weil es sich dort grundsätzlich um ein „Gefahrenwerden“ und nicht um ein Selbstfahren handelt, weil die entsprechenden Systeme zentral von Leitsystemen gesteuert werden und weil Komplexität und Möglichkeit unvorhergesehener Ereignisse in vielen Situationen beim Autofahren erheblich größer sein dürften als bei schienengebundenen Fahrzeugen.

Weiterhin ist beim Thema Akzeptanz auch daran zu denken, dass im traditionellen Autoverkehr eine weit entwickelte Kultur der Schadensregulierung besteht, die durch Verkehrsgerichtsbarkeit, Gutachterwesen und Versicherungen ein hohes Maß an Präzision und Verlässlichkeit erreicht hat. Für autonomes Fahren hingegen stellen sich neue Herausforderungen an die Schadensregulierung, weil die Frage „Wer verursachte den Schaden – Mensch oder Maschine?“ nachvollziehbar und juristisch einwandfrei beantwortet werden muss. Ob autonomes Fahren akzeptiert werden wird, wird sicher stark mit davon abhängen, dass auf diese Herausforderungen Antworten entwickelt werden, die der Präzision heutiger Schadensregulierung nicht nachstehen (s. Kap. 4 und Kap. 5).

30.5.3 Elemente des gesellschaftlichen Risikomanagements

Die vorgelegte Diagnose zu der Risikokonstellation zum autonomen Fahren in gesellschaftlicher Perspektive legt folgende Maßnahmen zum Risikomanagement nahe bzw. erfordert sie:

- Zulassungskriterien für autonome Fahrzeuge sind von den zuständigen Behörden zu entwickeln; bei Sicherheitsstandards sind hier auch zugrunde liegende ethische Fragen (wie sicher ist sicher genug?) und politische Aspekte (z. B. Gerechtigkeitsfragen, Datenschutz) zu berücksichtigen und gegebenenfalls in ordnungspolitische Maßnahmen zu überführen.

- Zentral sind rechtliche Regelungen zum Umgang mit den möglichen und vor allem kleinräumigen Unfällen beim autonomen Fahren, vor allem zur Schadensregulierung. Hier ist insbesondere die Produkthaftung gefragt (s. Kap. 25 und Kap. 26).
- In diesem Zusammenhang ist über eine Anpassung oder Erweiterung der Straßenverkehrsordnung nachzudenken.
- Konsequenzen für Fahrschulen entstehen hinsichtlich der erforderlichen Kompetenzen von Nutzerinnen und Nutzern autonomer Fahrzeuge, vor allem für den Wechsel des Modus von „manuell“ zu „autonom“ oder umgekehrt.
- Wichtig für das Risikomanagement sind Sicherheitsvorkehrungen, sowohl damit autonom geführte Fahrzeuge in kritischen Situationen sicher zum Halten kommen, als auch für den passiven Schutz der Insassen, wenn dies nicht gelingt.
- Ein Verzicht auf passive Sicherheitsmaßnahmen wie das Anschnallen oder Airbags wäre in dieser Perspektive erst verantwortbar, sobald genügend positive Erfahrungen mit dem autonomen Fahren vorliegen. Daher sollte diese Perspektive nicht zu früh in Aussicht gestellt werden.
- Die zu erwartende allmähliche Einführung von Technologien des autonomen Fahrens eröffnet vielfältige Möglichkeiten des Monitoring und des „Verbesserns im Betrieb“. Ihre Nutzung durch neue Sensor- und Auswertungstechnologien sollte ein wichtiges Element im gesellschaftlichen Risikomanagement sein (s. Kap. 17, Kap. 21 und Kap. 28).
- Risiken zum Arbeitsmarkt sind sorgfältig zu beobachten; im Falle des absehbaren Rückgangs von bisherigen Arbeitsplätzen sollten frühzeitig Maßnahmen zur Weiterbildung und Umschulung angesetzt werden.
- Erhebliche Probleme mit Datenschutz und Privatheit sind zu erwarten, falls das autonome Fahren in vernetzten Systemen stattfindet (wobei jedoch das autonome Fahren keine spezifischen Probleme aufwirft, verglichen mit anderen Handlungsfeldern). Technische und rechtliche Maßnahmen (s. Kap. 24) sind hier vor dem Hintergrund einer übergreifenden gesellschaftlichen Debatte (Stichworte NSA, Datenkraken) zu treffen.
- In Innovations- und Standortpolitik sind nationale Politiken gefragt, mit den jeweiligen Automobilherstellern über eine adäquate Verteilung derjenigen betrieblichen Risiken zu sprechen, die im Schadensfalle erhebliche volkswirtschaftliche Auswirkungen hätten, z. B. durch Reputationsverlust aufgrund einer medienwirksamen Panne oder eines Unfalls.
- Im Risikomanagement sind in Bezug auf öffentliche Kommunikation und die Informationspolitik die oben erwähnten Lehren aus Kernenergie- und Nanotechnologiedebatten einschlägig, die auf die Notwendigkeit der Ressource „Vertrauen“ aufmerksam machen.
- Die Einbeziehung von Stakeholdern ist selbstverständlich wichtig und entscheidend für eine gesellschaftliche Einführung bzw. „Aneignung“ des autonomen Fahrens. Hier sind vor allem die in Deutschland sehr einflussreichen Verbände der Autofahrerinnen und Autofahrer zu nennen. Für die gesamtgesellschaftliche Meinungsbildung sind die Massenmedien entscheidend. Weiterhin ist natürlich an den Verbraucherschutz zu denken.

- Es ist für eine erfolgreiche moderne Technikentwicklung zentral, dass sie nicht in einer mehr oder weniger geschlossenen Welt der Ingenieure, Naturwissenschaftler und Manager erfolgt, welche sich dann quasi hinterher um Akzeptanz für ihre eigenen Entwicklungen sorgen muss. Stattdessen sollte der Entwicklungsprozess (jedenfalls in den Teilen, die keinen direkten Wettbewerbsinteressen der Firmen unterliegen) in einer gewissen Offenheit erfolgen. Besagte Stakeholder sollten nicht erst in der Phase der Markteinführung, sondern bereits in der Entwicklung einbezogen werden. Ethische Fragen im Umgang mit Risiken und rechtliche Fragen der Verteilung von Verantwortung sollten parallel zur technischen Entwicklung erforscht und gesellschaftlich diskutiert werden.

Viele der hier angesprochenen Herausforderungen sind von einem komplexen systemischen Typ. Von daher kommt der Systemforschung auf verschiedenen Ebenen besondere Bedeutung zu. Das autonome Fahren sollte nicht simpel als Ersatz heutiger Fahrzeuge durch autonom fahrende thematisiert werden, sondern als Ausdruck neuer Mobilitätskonzepte in einer veränderten Gesellschaft.

Literatur

1. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen. acatech Position Nr. 9, Berlin 2011. Abrufbar unter: www.acatech.de/de/publikationen/publikationssuche/detail/artikel/akzeptanz-von-technik-und-infrastrukturen.html (Zugriff 29.7.2014)
2. Bechmann, G.: Die Beschreibung der Zukunft als Chance oder Risiko? Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 16 (1), 24–31 (2007)
3. Becker, U.: Mobilität und Verkehr. In: A. Grunwald (Hrsg.) Handbuch Technikethik, Metzler, Stuttgart (2013), S. 332–337
4. Beiker, S. (2012): Legal Aspects of Autonomous Driving. In: Chen, L.K.; Quigley, S.K.; Felton, P.L.; Roberts, C.; Laidlaw, P. (Hrsg.): Driving the Future: The Legal Implications of Autonomous Vehicles. Santa Clara Review. Volume 52, Number 4. S. 1145–1156. Online abrufbar unter <http://digitalcommons.law.scu.edu/lawreview/vol52/iss4/>
5. Eugensson, A., Brännström, M., Frasher, D. et al.: Environmental, safety, legal, and societal implications of autonomous driving systems (2013). Abrufbar unter: www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv23/23ESV-000467.PDF (Zugriff 29.7.2014)
6. Fraedrich, E., Lenz, B.: Autonomes Fahren – Mobilität und Auto in der Welt von morgen. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 23(1), 46–53 (2014)
7. Gasser, T., Arzt, C., Ayoubi, M. et al.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Fahrzeugtechnik F 83, Bremerhaven (2012)
8. Gethmann, C.F., Mittelstraß, J.: Umweltstandards. GAIA 1, 16–25. (1992)
9. Grunwald, A.: Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten“. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 14(3), 54–60 (2005)
10. Grunwald, A.: Technikfolgenabschätzung – eine Einführung. Ed. Sigma, Berlin, 2. Aufl (2010)
11. Nida-Rümelin, J.: Risikoethik. In: Nida-Rümelin, J. (Hrsg.) Angewandte Ethik. Die Bereichsethiken und ihre theoretische Fundierung, S. 863–887 Kröner, Stuttgart (1996)

12. Petermann, T., Bradke, H., Lüllmann, A., Poetzsch, M., Riehm, U.: Was bei einem Blackout geschieht. Folgen eines langandauernden und großflächigen Stromausfalls. Berlin, Edition Sigma, 2011
13. POST – Parliamentary Office of Science & Technology: Autonomous Road Vehicles. POSTNOTE 443, London www.parliament.uk/business/publications/research/briefing-papers/POST-PN-443/autonomous-road-vehicles (2013) Zugegriffen 30.7.2014
14. Radkau, J., Hahn, L.: Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft. oekom Verlag München 2013
15. Renn, O., Schweizer, P.-J., Dreyer, M., Klinke, A.: Risiko. Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit. oekom verlag, München (2008)

Eva Fraedrich, Barbara Lenz

Inhaltsverzeichnis

31.1 Einleitung 688

31.2 Wir fahren ... und fahren ... und fahren 689

 31.2.1 Gründe und Motive der Autonutzung 689

 31.2.2 Zusammenfassung 692

31.3 Multimethodischer Untersuchungsansatz zum autonomen Fahren
in Zusammenhang mit Autonutzung und -besitz 692

 31.3.1 Wahrnehmung und Bewertung des autonomen Fahrzeugs
 in Abhängigkeit von spezifischen Anwendungsfällen 693

 31.3.2 Autonomes Fahren in der Zukunft: „Wollen wir wirklich so leben?“ 699

 31.3.3 Ergebnisse 701

 31.3.4 Zusammenfassung 704

31.4 Fazit 704

 Literatur 706

E. Fraedrich (✉)
Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Deutschland
eva.fraedrich@geo.hu-berlin.de

B. Lenz
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V, Institut für Verkehrsforschung, Deutschland
Barbara.Lenz@dlr.de

31.1 Einleitung

Das Automobil prägt seit über einem Jahrhundert unsere physische Mobilität wie kein anderes Verkehrsmittel. Beinahe ebenso lange steht es jedoch auch schon im Zentrum einer Kritik, bei der es um ökologische, soziale und gesundheitliche Folgen geht, die mit Automobilität einhergehen.

Autonomes Fahren könnte einen Umbruch im individuellen und gesellschaftlichen Umgang mit dem Automobil nach sich ziehen und damit auch Einfluss nehmen auf Verkehr, Mobilität oder Raumstrukturen. In jüngster Zeit hat das Thema öffentlich viel Aufmerksamkeit erfahren – in den Massenmedien ist es mittlerweile Teil einer regelmäßigen Berichterstattung und auch auf sozialen Plattformen wird autonomes Fahren als Thema aufgegriffen, diskutiert und geteilt. In der öffentlichen Diskussion wird einerseits auf die derzeitige (wahrgenommene) technische Entwicklung abgehoben, aber auch auf den möglicherweise nachdrücklichen Wandel in der Nutzung des Autos, der einhergeht mit veränderten Einstellungen zum Auto und zum Autofahren. Erwartet werden Veränderungen wie z. B. ein dramatischer Rückgang der aktuellen Autobesitzraten [1], [2], eine Reduzierung des Raumes, der derzeit für Parkplätze zur Verfügung steht [3] oder ein Wandel von Automobilbesitz und -nutzung zugunsten von autonomen Carsharing-Flotten [4].

Die wachsende Präsenz des Themas zeigt: Die Debatte um autonomes Fahren und das autonome Fahrzeug kommt offenbar mehr und mehr in der Gesellschaft an. Beim Übergang in eine möglicherweise neue Ära von Autobesitz und -nutzung ist es wichtig, frühzeitig zu fragen, was Menschen mit dem autonomen Fahren verbinden: Wie nehmen sie die Technologie und die Auseinandersetzung damit wahr? In welchen Rahmen ist eine solche Auseinandersetzung eingebettet? Was sind Hoffnungen, Befürchtungen, Fantasien, wo wird die Technologie skeptisch, zuversichtlich, als machbar oder auch als unmöglich gesehen?

Eine erste systematisch fundierte Strukturierung des Themas aus Sicht von Verkehrsteilnehmern hat den Fokus auf die Fülle an unterschiedlichen Themen, Wahrnehmungen und Bewertungen gerichtet, die derzeit mit autonomem Fahren in Verbindung gebracht werden (für Details zur Erhebung und zu den Ergebnissen dieser Explorationsstudie s. Kap. 29). In diesem Zusammenhang ist auch deutlich geworden, dass autonomes Fahren stark aus einem subjektiven Nutzenkontext heraus bewertet wird und gleichzeitig eng an Motive, Werthaltungen und Praktiken zur eigenen Autonutzung gebunden ist. Die Verkehrsmittelwahl, d. h. die Entscheidung für ein bestimmtes Verkehrsmittel, und dabei insbesondere für das Auto, ist wiederum ein tief verwurzelter Teil unserer Alltagspraxis, der eher allmähliche als sprunghafte Veränderungen erwarten lässt [5], [6]. Derzeit ist noch nicht deutlich absehbar, wie eine Zukunft mit autonomen Fahrzeugen aussehen kann oder wird und welche Bereiche unseres Alltags, unseres Zusammenlebens oder unserer Mobilität dadurch Veränderungen unterworfen sein werden. Über den alltagspraktischen Rahmen, in den Autonutzung und -besitz eingebettet sind, wird der Kontext des autonomen Fahrens zumindest vorstellbarer.

Der Beitrag setzt sich zunächst mit aktuellen Erkenntnissen zum Thema Autonutzung und -besitz auseinander. Ausgewählte Ergebnisse aus eigenen Erhebungen richten anschließend den Fokus auf anwendungsbezogene – d. h. konkret, an den im Projekt entwickelten

Use-Cases (s. Kap. 2) orientierte – Perspektiven zum autonomen Fahren und prüfen, in welchem Zusammenhang das Thema mit Motivationen zu Autonutzung und -besitz steht.

31.2 Wir fahren ... und fahren ... und fahren ...

Die Frage, warum Menschen das Auto nutzen, beschäftigt Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedener Disziplinen – darunter vor allem Psychologie, Soziologie, Verkehrswissenschaften, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften – praktisch schon so lange, wie es das Automobil gibt [7]. Diese Debatte wird immer wieder hoch emotional geführt (vgl. [7], [8]), wohingegen Literatur und Studien, die sich mit dem individuellen und gesellschaftlichen Nutzen der Autonutzung auseinandersetzen, in diesem Zusammenhang deutlich in der Minderheit sind (vgl. [9], [10]). Vor dem Hintergrund der Diskussion um eine nachhaltigere Lebensweise, zu der auch die Reduktion des motorisierten Individualverkehrs maßgeblich beitragen könnte, hat sich in den vergangenen Jahren die Suche nach Gründen der Autonutzung intensiviert, was an der steigenden Zahl von wissenschaftlichen, aber auch populärwissenschaftlichen Arbeiten bzw. Texten zum Thema nachvollzogen werden kann.

Darüber hinaus gilt das Automobil als Teil eines komplexen, nicht-linearen Systems – dem System der Auto-Mobilität – das die Voraussetzungen für seine eigene Expansion immer wieder selbst reproduziert, was sich u. a. in wirkmächtigen komplexen technischen, politischen und sozialen Wechselbeziehungen zwischen Industrie, Zulieferern, Infrastrukturen, Ressourcennutzungen, Stadt- und Regionalplanung etc. zeigt [11]. Dadurch hat eine Pfadabhängigkeit eingesetzt und es ist ein „Lock-in“-Effekt entstanden, der sich kaum wieder rückgängig machen lässt (vgl. [11], [12], [13]). Stotz zeigt in diesem Zusammenhang auf, wie das technische Artefakt Automobil aktiv in soziale bzw. gesellschaftliche (Sozialisations-)Prozesse eingebunden ist und auf diese Weise eher den Status eines Subjekts denn den eines Objekts erhält (vgl. [14]). Auch andere Autorinnen und Autoren haben darauf hingewiesen, dass das Automobil selbst schon lange kein äußerliches Objekt mehr zu sein scheint, sondern vielmehr eine symbiotische Erweiterung des menschlichen Körpers (vgl. [15], [16], [17]). Daneben existiert jedoch auch eine Reihe von Untersuchungen, die die Bedeutung des Autos für physisches und psychisches Wohlbefinden und sogar eine höhere Lebenserwartung hervorheben (vgl. [18], [19], [20]).

Die Motivationen, die empirisch aufgedeckt wurden, ein Auto zu nutzen oder es zu besitzen, sind vielfältig. Im Folgenden sollen die dominantesten und aktuellsten Erklärungsversuche kurz vorgestellt werden.

31.2.1 Gründe und Motive der Autonutzung

Instrumentelle Motive

Lange Zeit wurden Motive für Autonutzung und -besitz durch Verhaltensmodelle erklärt, die sich vornehmlich auf instrumentelle bzw. utilitaristische Aspekte stützten (vgl. [21]).

Um ihre alltäglichen Mobilitätsanforderungen zu erfüllen – also verschiedene Aktivitäten an unterschiedlichen Orten auszuführen – greifen Menschen auf unterschiedliche Mittel der Fortbewegung zurück (Auto, Rad, Bahn etc.). Die Gründe dafür sind, so die Annahme, an einem spezifischen Nutzen orientiert: z. B. Verfügbarkeit, Geschwindigkeit, Kosten, Flexibilität, Sicherheit, Komfort etc. Wer daher das Auto als Mittel der Fortbewegung wählt, schätzt es als vorteilhaft gegenüber anderen Verkehrsmitteln ein, wenn es beispielsweise darum geht, schneller von A nach B zu kommen, möglichst günstig und komfortabel in den Urlaub zu fahren oder Zugang zu einem vom Wohnort entfernten Arbeitsplatz zu haben. Ob dieser Nutzen objektiv messbar ist, spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle; vielmehr geht es um einen subjektiv wahrgenommenen Nutzen, der nicht unbedingt mit einem tatsächlichen Nutzen zusammenhängen muss (vgl. [22]).

Stadtentwicklungskonzepte wie der „New Urbanism“ oder „Smart Growth“ beziehen sich vornehmlich auf die Annahme, dass instrumentelle Aspekte ausschlaggebend für die Verkehrsmittelwahl seien, und richten infrastrukturelle, verkehrsplanerische und politische Aktivitäten danach aus – Gebiete mit hoher Siedlungsdichte und Mischnutzung (Wohnen, Arbeiten, Einkaufen, Freizeit) sollen Wegelängen und Wegezeiten verkürzen und eine Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs ermöglichen (vgl. [23], [24], [25], [26]).

Affektive Motive

Instrumentelle Gründe allein sind jedoch noch nicht ausschlaggebend, um Verkehrsmittelwahlentscheidungen erschöpfend zu erklären [27], [28] – und darüber hinaus können sie auch nicht immer klar von anderen Motiven getrennt werden. Unabhängigkeit und Freiheit, dominante Gründe der Autonutzung, können sowohl als instrumentelle als auch als affektive Aspekte gedeutet werden: Die Freiheit, jederzeit – unabhängig z. B. von Fahrplänen – losfahren zu können, kann ein rationaler Grund für das Auto sein; gleichzeitig kann diese Freiheit auch ein *Gefühl* von Autonomie und Unabhängigkeit vermitteln – ein emotional konnotierter Grund für das Auto (vgl. [6], [29]).

Sowohl bei alltäglichen Fahrten als auch bei Wegen in der Freizeit spielen affektive bzw. emotionale Faktoren eine bedeutende Rolle. Verkehrsmittel wie das Auto sind eng an Emotionen und Empfindungen gekoppelt, die wiederum einen entscheidenden Einfluss auf deren Wahl (oder Nicht-Wahl) ausüben, wenngleich Autonutzerinnen und Autonutzer in direkten Befragungen häufig dazu neigen, ihre Motive und Motivationen zu rationalisieren und emotionale Aspekte „unter den Tisch fallen zu lassen“ [28]. So kann die Autonutzung beispielsweise mit Gefühlen von Entspannung und Vergnügen, Erregung und Begeisterung, der Freude am Fahren oder an der Geschwindigkeit, aber auch von Stress und Anspannung einhergehen; in der Regel wird das Autofahren mit positiven Gefühlen assoziiert [30], [31], [32].

Das Auto als Statussymbol: symbolische Motive und kulturelle Symbolbedeutung

Neben instrumentellen und affektiven Motiven beeinflussen auch symbolische Motive die Wahl des Autos (bzw. des Verkehrsmittels allgemein). Dabei erfüllen sie zwei Funktionen: Einerseits können durch das Nutzen und/oder Besitzen eines spezifischen Fahrzeugs per-

sönliche Wertvorstellungen und Identität ausgedrückt werden. Andererseits unterstreicht dies auch die soziale Einordnung in eine gesellschaftliche Position – ein Auto kann z. B. Status und Prestige vermitteln oder auch Ausdruck einer bestimmten Lebenseinstellung sein [28], [29], [30], [33], [34].

Darüber hinaus fungiert das Automobil selbst als kulturelles Symbol, es repräsentiert Fortschritt, Freiheit, Individualität und Kultiviertheit; es stimuliert Musik, Kunst, Literatur, Film und Werbung; es beeinflusst Familienleben, soziale Interaktion und kulturelle Rituale und ist integraler Bestandteil von Initiationsriten der modernen Gesellschaft (vgl. [11], [35], [36], [37]).

Weitere Ansätze

Neben der nicht immer trennscharfen Unterscheidung (vgl. dazu auch [6], [38]) von instrumentellen, affektiven und symbolischen Motiven existiert mittlerweile eine Reihe von Untersuchungen und Auseinandersetzungen, die das Automobil sowie Gründe für seine Nutzung stärker in den Kontext eines sozio-technischen Systems stellen und beleuchten, auf welche Weise das Auto spezifische soziale Funktionen erfüllt, wie es z. B. räumliche Ungleichheiten und Trennungen aufrechterhält, geschlechtliche Konstruktionen mitprägt oder nationale und kulturelle Identitäten festigen kann (vgl. z. B. [14], [39], [40], [41], [42], [43]).

Ein weiteres, im Kontext von Arbeiten zum Zusammenhang zwischen Autobesitz und autonomem Fahren wichtiges Thema ist das Auto als „privater Raum“ (vgl. [44], [45]). Der „Kokon“ Auto, ein „bewohnter“ Raum, kann als Rückzugsort aus dem als stressig, schnell, laut und überfüllt empfundenen modernen Leben fungieren, und er entfaltet darüber hinaus auch eine besondere Bedeutung hinsichtlich sozialer Interaktion. Laurier und Dant [46] haben auf die Bedeutung dieses „bewohnten“ Raumes auch im Hinblick auf das Aufkommen zunehmender Automatisierung von Fahrzeugen hingewiesen: Die Befreiung von der Fahraufgabe fügt sich ein in eine evolutionäre Entwicklung, bei der es im Zusammenhang mit dem Automobil im Laufe der letzten Jahrzehnte zunehmend weniger um das Ausdrücken von Identität geht (dies zeige sich auch im Bedeutungsverlust von Sportfahrzeugen und der Zunahme von geschlossenen Fahrzeugen mit großem Innenraum) als vielmehr um das temporäre „Bewohnen“ eines Raumes, der auch dazu dient, soziale Interaktionen zu vollziehen. Solche Studien betonen immer wieder, dass weniger individuelle als vielmehr soziale Faktoren eine maßgebliche Rolle bei der Favorisierung des Autos gegenüber anderen Verkehrsmitteln spielen können: Im Raum des Automobils werden spezifische soziale Rollen eingenommen, die Menschen üblicherweise im sozialen Miteinander ausüben (Eltern-Sein, Freund-Sein, Arbeiterin-Sein etc.) [42], [47].

In diesen Kontext könnten auch neuere Arbeiten zur Bewertung der Reisezeit bei der Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel gesetzt werden (vgl. [27], [48]). Lange Zeit wurde das Fahren im Auto als unproduktive, verschwendete Zeit gesehen – der häufig monotone, immer gleiche Weg zur Arbeit war ein typisches Beispiel dieser Last [49]. Dass im Auto verbrachte Zeit subjektiv aber durchaus als wertvoll, ja sogar als „Geschenk“ wahrgenommen und bewertet werden kann, haben in jüngerer Vergangenheit vor allem Jain

und Lyons [48] mit ihrer Studie über Pendler gezeigt: Reisezeit wurde als Entspannungszeit von der Hektik des Alltags gesehen, als Übergangszeit zwischen Arbeit und Zuhause. Diese Ergebnisse schließen an eine frühere Studie zu Pendlern an, in der Mokhtarian et al. bereits zeigen konnten, dass im Auto verbrachte Zeit durchaus nicht unbedingt als verschwendet angesehen wird [27].

31.2.2 Zusammenfassung

Aktuell gehen Autonutzung und -besitz in den Industrieländern auf eine Situation der Sättigung zu, ohne dass das Automobil deswegen seinen dominanten Stellenwert so schnell verlieren wird [50]. Vielmehr behält es für die große Mehrheit der Autonutzerinnen und -nutzer seine Bedeutung zur Erfüllung ihrer lebensweltlichen Bedürfnisse ([51], S. 114). Wichtig in der Debatte um die künftige Nutzung von autonomen Automobilen (und auch deren Akzeptanz) ist vor allem die Berücksichtigung der Verflechtung von instrumentellen, affektiven und symbolischen Aspekten: Wahrgenommene funktionale Eigenschaften der Technologie stellen möglicherweise auf den ersten Blick einen leicht messbaren, „objektiven“ Nutzen dar, aber diese funktionalen Aspekte entfalten ihre Bedeutung erst im Zusammenhang mit subjektiven – affektiven und symbolischen – Motivationen, die das autonome Fahren begleiten. Darüber hinaus spielt auch die Einbettung von instrumentellen Motiven der Nutzung eines (autonomen) Autos in einen alltagspraktischen Rahmen sowie in den Rahmen des jeweiligen sozio-technischen Systems eine Rolle: Das autonome Fahrzeug mag als sicher, flexibel und komfortabel wahrgenommen werden – zu einem tatsächlichen Nutzen wird dies aber erst dann, wenn Sicherheit, Flexibilität oder Komfort in der individuellen Alltagspraxis eine spezifische Bedeutung haben [51].

31.3 Multimethodischer Untersuchungsansatz zum autonomen Fahren in Zusammenhang mit Autonutzung und -besitz

Die Erkenntnisse aus der Forschung zu Autonutzung und -besitz und die Hinweise aus der ersten Explorationsstudie zum autonomen Fahren bilden die konzeptionelle Grundlage für die empirischen Arbeiten, die wir daran angeschlossen haben. Ziel dieser weiterführenden Untersuchungen ist, die spezifischen Zuschreibungen, die derzeit von Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmern gegenüber dem autonomen Auto vorgenommen werden, anwendungsbezogen zu erheben und die „Übersetzung“ solcher Zuschreibungen in instrumentelle, affektive und symbolische Motive zu entschlüsseln. Damit heißt die forschungsleitende Frage: Welche Eigenschaften und Bewertungen verbinden Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer mit dem autonomen Fahren und dem autonomen Fahrzeug, und welche unterschiedlichen Motive sind dafür ausschlaggebend? Gleichzeitig soll der Kontext der heutigen Zuschreibungen gegenüber dem autonomen Automobil analysiert und, wo möglich, in Zusammenhang mit bestehenden Alltags- und Mobilitätspraktiken gebracht werden. Auf

diese Weise kann anschließend erfasst werden, welche Einstellungen und Bewertungen Auswirkungen auf die Akzeptanz der Technologie erwarten lassen.

Dafür wurde ein multimethodisches Vorgehen gewählt: Um mögliche Varianzen der Wahrnehmung und Bewertung zu explorieren, wurden Befragte in einer quantitativen Online-Erhebung mit spezifischen Anwendungsfällen des autonomen Fahrens konfrontiert. Ergänzend wurde im Rahmen dieser quantitativen Erhebung eine Freitext-Befragung durchgeführt – die Teilnehmerinnen und Teilnehmer hatten so die Möglichkeit, ihre ganz eigenen Zuschreibungen zum autonomen Fahren vorzunehmen. Eine tiefergehende Analyse mit Blick auf den Kontext, in dem autonomes Fahren derzeit wahrgenommen und bewertet wird, erlaubten entdeckende qualitative Verfahren, die parallel im Rahmen von Gruppendiskussionen durchgeführt wurden. Hier lag der Fokus insbesondere auf der Ambivalenz der Technikbewertung (s. Kap. 29) und damit auf Erwartungen einerseits und Befürchtungen andererseits für den Fall einer Implementierung der Technologie. Entdeckende qualitative Verfahren erscheinen besonders geeignet, das noch relativ neue Forschungsfeld zu beleuchten, in dem es bisher kaum Erkenntnisse über Einstellungen und Motive zum autonomen Fahren aus Nutzersicht gibt – der offene Charakter solcher Untersuchungen hilft, diese Motive zu entschlüsseln.

31.3.1 Wahrnehmung und Bewertung des autonomen Fahrzeugs in Abhängigkeit von spezifischen Anwendungsfällen

Die vier Use-Cases, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurden (s. Kap. 2), lassen auch im Hinblick auf ihre akzeptanzrelevanten Aspekte je unterschiedliche Wahrnehmungen und Bewertungen des autonomen Fahrens erwarten, denn sie sind nicht nur mit unterschiedlichen technischen Merkmalen versehen, sondern auch mit spezifischen Implikationen, Anwendungsbereichen und Zuschreibungen assoziiert (s. hierzu auch Kap. 6, Kap. 11, Kap. 12 und Kap. 32). In einer quasi-repräsentativen Fragebogenerhebung wurden daher mithilfe der Use-Cases differenzierte Einstellungen zum autonomen Fahren erfasst. Befragt wurden dabei 1000 Personen, die hinsichtlich Geschlecht, Alter, Einkommen und Bildungsabschluss der Struktur der Gesamtbevölkerung in Deutschland entsprechen. Eine ausführliche Beschreibung der Erhebung – die in Kooperation mit mehreren Autorinnen und Autoren in diesem Buch entwickelt und durchgeführt wurde – und der Stichprobe kann in Kap. 6 nachgelesen werden.

Insgesamt haben 57 Prozent der Befragten ein generelles Interesse gegenüber dem Thema autonomes Fahren deklariert. 44 Prozent geben in einer ergänzenden Frage allerdings an, über keine Kenntnisse zum Thema zu verfügen und nur 4 Prozent bezeichnen sich selbst als gut informiert, fachkundig oder gar als Expertin bzw. Experte. Informationen zum autonomen Fahren beziehen 78 Prozent aus den Massenmedien, 64 Prozent wenden sich direkt an Experten, 56 Prozent besprechen sich mit Freunden oder Kollegen, und 40 Prozent tauschen sich in sozialen Medien aus.

Nach einem allgemeinen Teil mit Fragen zu Soziodemografie, Verkehrsverhalten, Mobilitätsbedürfnissen etc. wurden die Befragten zufällig je einem von insgesamt vier

Szenarien – basierend auf den vier Use-Cases – zugewiesen. Die Szenarien wurden ihnen dabei in Form einer Kurzbeschreibung vorgelegt:

Szenario Autobahnpilot: Auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Schnellstraßen kann das Fahren an das Fahrzeug übertragen werden. Die Fahrerin/der Fahrer muss in dieser Zeit nicht auf den Verkehr bzw. die Fahraufgabe achten und kann anderen Tätigkeiten nachgehen.

Szenario Autonomes Valet-Parken: Nach dem Aussteigen aller Passagiere kann das Fahrzeug allein zu einem vorher festgelegten Parkplatz fahren und von dort auch wieder zurück zu einer Abholadresse.

Szenario Vollautomatisiertes Fahrzeug: Auf Wunsch oder bei Bedarf kann das Fahren an das Fahrzeug übertragen werden. Die Fahrerin/der Fahrer muss in dieser Zeit nicht auf den Verkehr oder die Fahraufgabe achten und kann anderen Tätigkeiten nachgehen.

Szenario Vehicle-on-Demand: Ein Vehicle-on-Demand ist ein Fahrzeug, das seine Passagiere ohne Fahrerin oder Fahrer fährt. Menschen können in einem solchen Fahrzeug nicht mehr selbst fahren – im Innenraum des Fahrzeugs gibt es daher auch kein Lenkrad und keine Pedalerie mehr.

Eine an die Vorstellung des jeweiligen Use-Case angeschlossene Frage thematisierte die grundsätzliche Bereitschaft der Probanden, ihr bisher bevorzugtes Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen. Diese Frage war in der gleichen Form auch schon im ersten, allgemeinen Teil der Erhebung gestellt worden, dort allerdings relativ unspezifisch „ein autonomes Fahrzeug“ bezeichnend, ohne dass hierzu eine Erklärung gegeben wurde. Dabei zeigte sich, dass der Wunsch, sein eigenes Fahrzeug (bzw. „Lieblingsverkehrsmittel“) durch ein autonomes Fahrzeug – ob genauer spezifiziert oder nicht – zu ersetzen, bei den Befragten relativ gering ausgeprägt ist: Nur zwischen 11 und 15 Prozent können der Aussage überwiegend oder voll zustimmen (s. Abb. 31.1). Allerdings sagen 27 Prozent, dass sie es sich wenig oder gar nicht vorstellen können, das Lieblingsverkehrsmittel durch ein (nicht spezifiziertes) autonomes Fahrzeug zu ersetzen. Wird, wie in der Erhebung, autonomes Fahren in Bezug auf einen konkreten Anwendungsfall (Use-Case) erläutert, steigt der Grad der Ablehnung deutlich an (und liegt zwischen 44 und 54 Prozent). Das heißt: Die Ablehnung wird durch die Konkretisierung deutlicher zum Ausdruck gebracht. Die geringste Zustimmung ist übrigens für das Vehicle-on-Demand zu verzeichnen – 54 Prozent würden ihr präferiertes Verkehrsmittel nicht damit ersetzen wollen, und nur 11 Prozent könnten sich dies tatsächlich vorstellen.

Um zu explorieren, welche Assoziationen die Befragten in Bezug auf ein autonomes Fahrzeug derzeit vornehmen, wurden sie gebeten, in bis zu 15 Freitextfeldern mit eigenen Worten zu erklären, was sie unter einem autonomen Fahrzeug verstehen. Basis war auch hier wieder die Kurzbeschreibung (s. o.). Die folgende Auswertung bezieht sich ausschließlich auf die Antworten derjenigen Befragten, denen die Anwendungsfälle „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“ und „Vehicle-on-Demand“ zugeordnet worden waren:

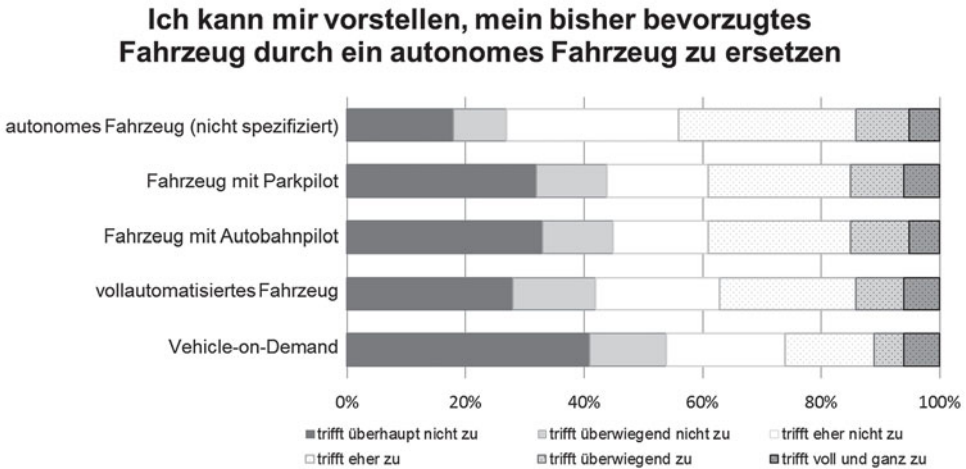


Abb. 31.1 Bereitschaft, das präferierte Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen

Die Antworten der je 250 Befragten wurden manuell zusammengefasst, kategorisiert und anschließend spezifischen Konnotationen zugeordnet (s. Abb. 31.2). Für den Anwendungsfall Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer gab es insgesamt 3750 Einträge; davon waren 2587 (69 Prozent) aus verschiedenen Gründen ungültig, z. B. weil der Bezug zur Frage nicht erkennbar war. Beim Vehicle-on-Demand gab es insgesamt 3750 Einträge, von denen 2512 (67 Prozent) ungültig waren. Abbildung 31.2 zeigt die Verteilung von Aussagen mit verschiedenen Konnotationen: positiv, ambivalent, negativ oder ohne Konnotation – die ungültigen Beiträge sind dabei schon heraus gerechnet, die Prozentzahlen beziehen sich auf die verbliebenen Nennungen.

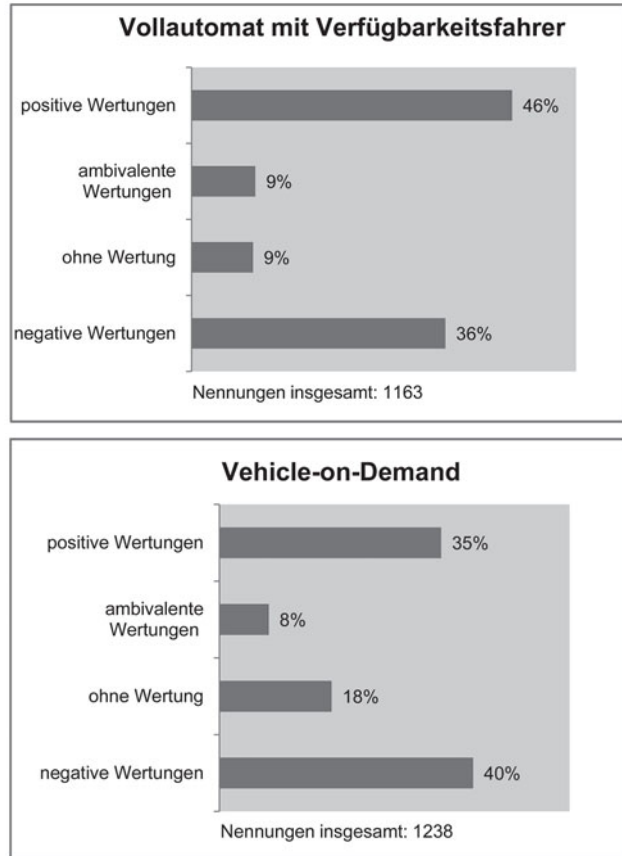
Während für den Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer eine knappe Mehrheit positiv konnotierte Beschreibungen verwendet, trifft dies nur für 35 Prozent der Begriffe beim Vehicle-on-Demand zu. 40 Prozent der Aussagen waren eher negativ konnotiert – beim Vollautomaten waren dies 36 Prozent der Begriffe. Ein kleinerer Teil der Begriffe (9 bzw. 8 Prozent) war ambivalent – d. h., solche Aussagen konnten nicht als eindeutig positiv oder negativ identifiziert werden.

Insgesamt fallen die Zuordnungen, die unabhängig voneinander jeweils dem einen (Vollautomat) oder dem anderen (Vehicle-on-Demand) Fahrzeug zugeschrieben wurden, relativ ähnlich aus; viele Antwortkategorien sind sowohl bedeutungsgleich als auch ähnlich bezüglich ihrer prozentualen Verteilung. Auf einige prägnante Unterschiede wird nachfolgend eingegangen. Außerdem werden die Zuschreibungen, wo dies sinnvoll erscheint, daraufhin geprüft, welche instrumentellen, emotionalen und symbolischen Eigenschaften dem autonomen Fahrzeug zugeschrieben werden.

Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Im Feld „Positive Wertungen“ entfielen 17 Prozent der Aussagen auf die Antwortkategorie „bequem“, gefolgt von „gut“ (13 Prozent), „sicher“ (11 Prozent), „entspannend“ (10 Pro-

Abb. 31.2 Konnotationen zu autonomen Fahrzeugen: Vollautomat und Vehicle-on-Demand



zent) und „modern“ (10 Prozent) – in Tab. 31.1 sind diese prozentualen Verteilungen dargestellt. 8 Prozent aller Antworten im Bereich „Ambivalente Wertungen“ entfielen auf die Kategorie „Luxus“ und 15 Prozent aller Aussagen im Bereich „Negative Wertungen“ auf die Kategorie „teuer“. Nur in der Antwortkategorie „nichts für mich“ waren in diesem Bereich mit 16 Prozent mehr Aussagen vertreten. Die Kategorie „Luxus“ tritt beim Vehicle-on-Demand wiederum kein einziges Mal auf, und „teuer“ rangiert mit 7 Prozent aller Aussagen bei den negativen Wertungen nur auf Platz 7.

Im Bereich der positiven Wertungen werden mit dem Vollautomaten hauptsächlich Aspekte assoziiert, die als funktional (bzw. instrumentell) klassifiziert werden können – ein solches Fahrzeug wird als „bequem“, „sicher“, „praktisch“, „effizient“, „für Mobilitätseingeschränkte“, „eine Hilfe“, „umweltfreundlich“ und „flexibel“ beschrieben. Beim Vehicle-on-Demand wird noch der wahrgenommene Aspekt der Nützlichkeit ergänzt (dafür fehlt hier die Zuordnung „eine Hilfe“). Als deutlich emotional bzw. affektiv besetzt konnten für den Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer nur die positiven Zuschreibungen „entspannend“, „genial“ und „aufregend“ identifiziert werden, Gleiches gilt für das Vehicle-on-

Tab. 31.1 Antworten im Textfeld „Ein Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer ist ...“ – zusammengefasst und kategorisiert

<i>Positiv</i>	<i>in %</i>	<i>Ambivalent</i>	<i>in %</i>	<i>Negativ</i>	<i>in %</i>
bequem	17%	die Zukunft	48%	nichts für mich	16%
gut	13%	utopisch	23%	teuer	15%
sicher	11%	gewöhnungsbedürftig	22%	unnötig	12%
entspannend	10%	Luxus	8%	unheimlich	11%
modern	10%	Gesamt: 106	100%	unsicher	11%
praktisch	9%			nicht ausgereift	9%
genial	7%	<i>Ohne Wertung</i>	<i>in %</i>	langweilig	7%
effizient	6%	autonom	29%	technikabhängig	7%
interessant	5%	keine Ahnung	20%	unberechenbar	7%
für Mobilitäts- eingeschränkte	4%	Sinn nicht verständlich	18%	gefährlich	3%
eine Hilfe	3%	ähnlich wie andere Verkehrsmittel	12%	schrecklich	1%
aufregend	2%	keine Fahrzeuge	11%	Gesamt: 422	100%
umweltfreundl.	2%	ein Auto	6%		
flexibel	2%	Verständnisfragen	5%		
Gesamt: 533	100%	Gesamt: 102	100%		

Demand („genial“ wird hier durch die schwächer konnotierten Kategorien „toll“ und „gut“ ersetzt). Im Bereich der negativen Wertungen stellt sich die Verteilung von funktional versus emotional konnotierten Aspekten dagegen umgekehrt dar: „unheimlich“, „langweilig“, „gefährlich“, „schrecklich“ (beim Vehicle-on-Demand zusätzlich: „beängstigend“) sind eindeutig affektiv besetzte Kategorien, während „teuer“ und „nicht ausgereift“ eher funktionale Aspekte bezeichnen. Antwortkategorien, die eine symbolische Konnotation vermuten lassen, finden sich in den Aussagen insgesamt kaum – am ehesten deuten noch Antworten der Kategorien „modern“, „interessant“ oder „Luxus“ darauf hin, dass ein solches autonomes Fahrzeug auch in Verbindung mit Aspekten wahrgenommen und bewertet wird, die den durch das Fahrzeug zum Ausdruck gebrachten Status betreffen.

Vehicle-on-Demand

Tabelle 31.2 zeigt die zusammengefassten und kategorisierten Zuschreibungen, wie sie für das Vehicle-on-Demand vorgenommen wurden, in ihrer prozentualen Verteilung. Die Topantwortkategorien im Feld „Positive Wertungen“ unterscheiden sich kaum von denen, die für den Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer festgestellt werden konnten: Einzig auf Platz 1 taucht mit 15 Prozent aller hier gemachten Aussagen die Kategorie „nützlich“ komplett neu auf. Außerdem beschreiben die Befragten das Fahrzeug mit „bequem“ (14 Prozent), „entspannend“ (13 Prozent), „modern“ (12 Prozent) und „sicher“ (10 Prozent). Für das

Tab. 31.2 Antworten im Textfeld „Ein Vehicle-on-Demand-Fahrzeug ist ...“ – zusammengefasst und kategorisiert

<i>Positiv</i>	<i>in %</i>	<i>Ambivalent</i>	<i>in %</i>	<i>Negativ</i>	<i>in %</i>
nützlich	15%	die Zukunft	41%	nichts für mich	16%
bequem	14%	utopisch	41%	technikabhängig	12%
entspannend	13%	gewohnungsbedürftig	18%	unnötig	11%
modern	12%	Gesamt: 96	100%	beängstigend	10%
sicher	10%			unsicher	10%
toll	9%	<i>Ohne Wertung</i>	<i>in %</i>	unberechenbar	7%
interessant	6%	keine Ahnung	50%	teuer	7%
effizient	5%	autonom	22%	gefährlich	7%
für Mobilitäts- eingeschränkte	4%	Sinn nicht verständlich	17%	nicht ausgereift	6%
gut	4%	keine Fahrzeuge	6%	unheimlich	6%
umweltfreundlich	4%	ein Auto	2%	langweilig	5%
günstig	2%	ähnlich wie andere Verkehrsmittel	2%	schrecklich	2%
aufregend	2%	Verständnisfragen	1%	Gesamt: 493	100%
Gesamt: 431	100%	Gesamt: 218	100%		

Vehicle-on-Demand sind 18 Prozent der Zuschreibungen ohne Wertung. Von diesen 18 Prozent entfällt die Hälfte auf die Antwortkategorie „keine Ahnung“ – im Vergleich dazu erklären beim Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer nur 20 Prozent, sie hätten „keine Ahnung“. Nur 2 Prozent der Aussagen in der Sparte „ohne Wertung“ entfällt auf die Antwortkategorie „ähnlich wie andere Verkehrsmittel“ – beim Vollautomaten waren es 12 Prozent. Unter diese Kategorie waren Einträge gefasst wie „Ein Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer ist ,wie die Bahn“ oder „Ein Vehicle-on-Demand-Fahrzeug ist ,ein Taxi“.

Immerhin ein Viertel aller negativen Aussagen entfällt beim Vehicle-on-Demand auf die emotional stark besetzten Antwortkategorien „beängstigend“ (10 Prozent), „gefährlich“ (7 Prozent), „unheimlich“ (6 Prozent) und „schrecklich“ (2 Prozent). Beim Vollautomaten wird „beängstigend“ dagegen kein einziges Mal assoziiert, und nur 15 Prozent der Aussagen bezeichnen ihn als „unheimlich“ (11 Prozent), „gefährlich“ (3 Prozent) oder „schrecklich“ (1 Prozent).

31.3.1.1 Zusammenfassung

Die Befragung macht deutlich: Insgesamt werden einem Vehicle-on-Demand am meisten negative und am wenigsten positive Bewertungen entgegengebracht. Von den 250 Befragten, die diesem Use-Case zugeteilt wurden, können sich 54 Prozent nicht vorstellen, ihr derzeit präferiertes Verkehrsmittel durch ein Vehicle-on-Demand zu ersetzen. Auch im direkten Vergleich mit einem vollautomatisierten Fahrzeug mit Verfügbarkeitsfahrer wird das

Vehicle-on-Demand mit eher negativen Aussagen beschrieben; ein Viertel aller Beschreibungen sehen ein solches Fahrzeug sogar als beängstigend, gefährlich, unheimlich oder schrecklich an. Unter einem Vehicle-on-Demand können sich die Befragten offensichtlich auch weniger vorstellen als unter einem Fahrzeug, bei dem das Selbstfahren weiterhin möglich wäre, das zeigen die zahlreichen Aussagen in der Kategorie „keine Ahnung“.

Die Antwortkategorien „teuer“ und „Luxus“, die insbesondere bzw. ausschließlich dem Vollautomaten zugeschrieben werden, lassen den Schluss zu, dass ein solches Fahrzeug noch deutlich mit dem individuellen Privatbesitz in Verbindung gebracht wird, wohingegen das Vehicle-on-Demand nur in einigen wenigen Aussagen überhaupt mit anderen Verkehrsmitteln verglichen wird.

Eine Zuordnung von Aussagen zu den autonomen Fahrzeugen zu entweder instrumentellen, affektiven oder symbolischen Aspekten ergab, dass im Bereich positiv konnotierter Wertungen instrumentelle Zuschreibungen überwiegen, während bei den negativen Wertungen stark emotional geprägte Aussagen in der Mehrheit sind. Aussagen, bei denen der Status-Charakter der autonomen Fahrzeuge im Vordergrund steht, konnten dagegen nicht eindeutig identifiziert werden. In der nachfolgend beschriebenen qualitativen Erhebung werden die wahrgenommenen negativen Aspekte des autonomen Fahrens genauer in den Blick genommen und daraufhin untersucht, in welchen sozio-technischen Kontext sie eingebettet sind. Vor allem solche ablehnenden Zuschreibungen, das konnte bereits die Explorationsstudie zeigen (s. Kap. 29), sind stärker an offenbar subjektbezogenen und affektiven Aspekten sowie am Kontext von Autonutzung und -besitz orientiert.

31.3.2 Autonomes Fahren in der Zukunft: „Wollen wir wirklich so leben?“¹

Die folgenden Ergebnisse beruhen auf drei Gruppendiskussionen in Berlin, deren Zusammensetzungen jeweils variierten. Alle Teilnehmenden hatten einen höheren Bildungsabschluss bzw. konnten dem akademischen Bereich zugeordnet werden – sie studierten, arbeiteten an einer Universität oder an einer außeruniversitären Forschungseinrichtung. Die Diskussionen wurden mit je fünf, sechs und sieben Teilnehmenden, alle wohnhaft in Berlin, durchgeführt, darunter insgesamt sieben Frauen. In der ersten Diskussionsrunde war der Abstand zwischen jüngstem und ältestem Teilnehmer am größten; der jüngste Teilnehmer dieser Gruppe war 20 Jahre, der älteste 50 Jahre alt. Alle Teilnehmenden nutzten regelmäßig ein Auto, nicht alle besaßen eines. Am Ende der jeweiligen Diskussion wurden Daten zur Soziodemografie und zum Verkehrsverhalten sowie Kennzahlen zu Pkw-Nutzung und -Besitz erhoben. Alle Teilnehmenden hatten vor den Treffen schon einmal vom autonomen Fahren gehört.

Zu Beginn der Treffen wurde den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein bebildertes narratives Szenario zum autonomen Fahren in DIN-A4 Flyer-Format vorgelegt. Es gab

¹ Die Frage entstammt einem Kommentar aus den nachfolgend beschriebenen Gruppendiskussionen.

zwei unterschiedliche Szenarien – einmal zum „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ und einmal zum „Vehicle-on-Demand“, zu denen pro Gruppe jeweils eines vorgelegt und im Rahmen einer gruppengestützten Introspektion verwendet wurde. Ziel einer solchen Introspektion ist es, Prozesse der „inneren Beobachtung“ explizit zu machen, also die Konzentration und Aufmerksamkeit bewusst auf innere Vorgänge zu lenken ([52], S. 493). Unter Leitung einer Forschungsperson befassen sich Teilnehmende einer Gruppe mit dem jeweiligen Forschungsgegenstand, dokumentieren dabei unabhängig voneinander ihre inneren Prozesse und Erlebnisse und teilen anschließend die durch Selbstbeobachtung gewonnenen Erfahrungen mit der Gruppe, ohne dass Wertungen und Kommentare vorgenommen werden. In einem zweiten Durchlauf können die teilnehmenden Personen – durch die gehörten Erlebnisse zu weiteren Ausführungen animiert – ihre Berichte ergänzen. Zusammen mit dem Szenario erhielten die Teilnehmenden folgende Aufforderung:

Sie erhalten nun eine kurze Szenario-Beschreibung zum Autoverkehr der Zukunft – also eine kleine Geschichte zum Thema, wie das Autofahren von morgen aussehen könnte. Bitte lesen Sie sich die Geschichte durch. Versuchen Sie, sich in das Gelesene hineinzusetzen und denken Sie an Ihre Gefühle, Fantasien und Empfindungen – seien Sie offen für alles, was während der Auseinandersetzung mit dem Thema in Ihnen vorgeht!

Bitte machen Sie sich Notizen zu Ihrem Erleben.

Die Notizen wurden als sogenannter „Introspektionsbericht“ anschließend von den Teilnehmenden jeweils reihum vorgetragen. Die Berichte wurden später transkribiert und mittels Qualitativer Heuristik ausgewertet. Anders als die oftmals unbewusst ablaufenden Alltagsentdeckungsverfahren ist die Qualitative Heuristik „*regelgeleitet* und mit einer *Methodologie* versehen“ und als systematisiertes und intersubjektiv nachvollziehbares Such- und Findeverfahren ausgestaltet ([53], S. 226). Der Methode liegen vier Regeln zugrunde:

1. Offenheit der Forschungsperson/ des Subjekts,
2. Offenheit des Forschungsgegenstandes/ des Objekts,
3. maximale strukturelle Variation der Perspektiven,
4. Analyse auf Gemeinsamkeiten.

Darüber hinaus wendet die Qualitative Heuristik das sogenannte Dialogprinzip an: An einen Gegenstand (in der Untersuchung die transkribierten Introspektionsberichte) werden Fragen gestellt, auf die dieser „Antworten“ gibt – danach werden, aus einer anderen Perspektive bzw. einem weiteren Blickwinkel, neue Fragen gestellt etc. Forschungsgegenstand und Forschungsperson stehen somit in enger dialogischer Verbindung, und auch die strenge Zweiteilung zwischen (Forschungs-)Subjekt und (Forschungs-)Objekt wird auf diese Weise aufgeweicht.

Im Anschluss an die Erstellung des Introspektionsberichtes wurde die offene Gruppendiskussion gestartet, die sich an impliziten Handlungsmustern (vgl. [54]) zu Autonutzung

und -besitz orientierte. Die nachfolgende Ergebnisdarstellung fokussiert allerdings auf das, was die Teilnehmerinnen und Teilnehmer in den Introspektionsberichten zum Ausdruck brachten.

31.3.3 Ergebnisse

Die Szenarien, die den Teilnehmenden der Gruppendiskussionen vorgelegt wurden, haben großes Interesse, aber auch eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema angeregt. Exemplarisch werden im Folgenden Themen beschrieben, die sich bereits in der vorangegangenen, explorativen Erhebung als bedeutsam erwiesen hatten. Die Introspektionsberichte wiesen eine ambivalente Haltung gegenüber dem autonomen Fahren auf, vergleichbar zu den Ergebnissen der Untersuchung, die in Kap. 29 dargestellt wird.

Ergänzend wurde jedoch deutlicher, welche spezifischen Ängste und Sorgen in Bezug auf das autonome Fahren bestehen bzw. welcher gesellschaftliche Kontext damit assoziiert wird. Im Folgenden soll dieser ablehnende Horizont des autonomen Fahrens in den Blick genommen werden – die Ergebnisse entstammen den beiden Gruppen, die das Szenario zum „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ vorgelegt bekamen.

31.3.3.1 Skepsis gegenüber einer Zukunft mit autonomen Fahrzeugen

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass in dem Szenario, das den Teilnehmerinnen und Teilnehmern vorgelegt wurde, die Protagonistin „Yvonne“ die Zeit, die durch die Befreiung von der Fahraufgabe zur Verfügung steht, u. a. nutzte, um in ihrem Fahrzeug Arbeitstätigkeiten nachzugehen (z. B. E-Mail-Korrespondenz). Daneben wurden zwar auch andere Tätigkeiten abgedeckt, aber der Fokus der Darstellung lag eher auf typischen Organisationstätigkeiten (Kind zur Schule bringen, Einkäufe organisieren etc.) als auf Freizeit- oder Entspannungsaktivitäten (aus dem Fenster schauen, Filme gucken, schlafen/relaxen etc.). So könnten skeptische und ablehnende Haltungen der (vor allem jüngeren) Gruppendiskussionsteilnehmer gegenüber dem autonomen Fahren möglicherweise auch der Tatsache geschuldet sein, dass das Leben in der Zukunft ohnehin schon deutlich mit strukturierten und optimierten Alltagsabläufen belegt war.

Andererseits lassen sich die Eigenschaftszuschreibungen des autonomen Fahrens, die von den Teilnehmenden vorgenommen wurden, klar in die vorangegangenen Erhebungen einordnen: Sowohl bei der Explorationsstudie als auch bei der quantitativen Befragung tauchten immer wieder die gleichen Zuschreibungen auf.

Die „beschleunigte Leistungsgesellschaft“

Dass man seine Zeit in einem autonomen Fahrzeug künftig mit anderen Tätigkeiten verbringen könnte, wurde in den Diskussionen mehrheitlich negativ assoziiert. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer äußerten in ihren mündlich vorgetragenen Introspektionsberichten die Sorge, dass sich durch die Möglichkeit, künftig im Auto nicht mehr auf die Fahraufgabe konzentriert sein zu müssen, Privat- bzw. Freizeit- und Arbeitstätigkeiten zu

stark miteinander vermischen würden – dass also die Technologie letztlich einen Trend vorantreiben könnte, den viele heute schon als bedenklich identifizierten: eine immer stärker an Leistung und Effizienz orientierte Gesellschaft:

Johanna²: „Und dass sich immer mehr das Privatleben und das Arbeitsleben vermischt und man zum totalen Workaholic wird.“

Timo: „Größer wird diese Belastung, gleichzeitig immer mehr Dinge am selben Ort tun zu müssen.“

Aus der Freiheit und der Möglichkeit, sich während der Autofahrt anderweitig zu beschäftigen, würde damit ein Druck, solch eine Beschäftigung in den Dienst der Effizienz zu stellen. Demgegenüber wurde die Aufgabe, sich konzentrieren zu müssen, beim konventionellen Autofahren als etwas Positives dargestellt:

Johanna: „Das ist ja eigentlich auch was Schönes beim Autofahren, dass man sich auf diese Sache jetzt konzentrieren muss und auch was mit den Händen macht und eben nicht schon die E-Mails von der Arbeit checkt. Das fängt erst an, wenn man im Büro sitzt.“

„Diese Abhängigkeit von der Technik“

Eine weitere Konsequenz, die mit dem autonomen Fahren in Zusammenhang gebracht wird, ist eine künftige Technikabhängigkeit, die in der Folge auch mit einem stärkeren, als negativ empfundenen Kontrollverlust einhergehen könnte. Technikabhängigkeit und Kontrollverlust werden auch deshalb als problematisch empfunden, weil Skepsis gegenüber der Zuverlässigkeit der Technologie besteht, in deren Entscheidungen man dann aber nicht mehr eingreifen könnte:

Nico: „Dass man in bestimmten Situationen einfach spontan entscheiden kann und es viel besser im Gefühl hat als vielleicht das Auto.“

Julian: „Und offenbar kann man da auch nicht sofort eingreifen, wenn ich erstmal 5, 4, 3, 2, 1...Piep hören muss.“

Hinter solchen Sorgen steht offenbar eine grundlegende Skepsis gegenüber Technologie, umso mehr, als sie, wie im Falle des autonomen Fahrens, stark in die individuelle Sicherheit eingreift:

Julian: „Ich vertraue noch nicht einmal meinem Wasserkocher blind, warum sollte ich dann meinem Auto mit meinem Leben blind vertrauen? Das fände ich irgendwie unglaublich befremdlich.“

2 Die Namen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer wurden geändert, um deren Anonymität zu gewährleisten.

Das Leben wird „entspaßt“ und „du wirst träge“

Der Wegfall der Fahraufgabe beim autonomen Fahrzeug wird durchaus kritisch gesehen. Damit verbunden ist vor allem die Vorstellung, ein Fahrzeug, in dem man nicht selbst fährt, würde Spaß, Spontaneität, Individualität, Flexibilität und Kontrolle beschneiden (interessant ist in diesem Zusammenhang allerdings, dass die Teilnehmenden ja eigentlich den Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer vorgelegt bekommen hatten, bei dem – dies ist auch im Szenario beschrieben – die Fahrerin oder der FahrerIn durchaus noch selbst fahren kann, wenn sie oder er das möchte):

Johanna: „Was ist eigentlich dann noch der Unterschied zu den öffentlichen Verkehrsmitteln? Denn am Auto schätze ich eigentlich immer, dass ich das selbst in der Hand habe, dass ich das selbst einschätzen kann. Und wenn ich halt zu spät bin, dann drücke ich ein bisschen aufs Gas.“

Die „Entspañung“ (Timo) bezieht sich einerseits ganz konkret auf den Verlust des Fahrspaßes, aber auch auf den Lebensstil, der durch autonomes Fahren entspaßt werden könnte:

Bettina: „Diese Bewegung fällt ja dann weg, weil du kannst dich überall von dem Auto abholen lassen; du wirst faul, du wirst träge, du fährst nur noch mit dem Auto, weil es ja egal ist, ob du dich krank fühlst oder nicht oder wie es dir geht – du kannst ja alle Wege mit dem Auto machen.“

Soziale Isolation: „Kein Mensch braucht den Menschen mehr“

Die Konsequenz aus einer solchen „Entspañung“ und Trägheit ist aus Sicht der Gruppendiskussionsteilnehmer, dass der Mensch schlussendlich ersetzt würde: *„Kein Mensch braucht den Menschen mehr“* (Inga), für alles würde es dann eine Maschine geben, und auch das Denken würde einem auf diese Weise abgenommen werden:

Inga: „Das Auto fährt, man muss nicht mehr selbst fahren. Das Essen wird irgendwie geliefert, man hockt so ein bisschen autistisch in seiner Wohnung und verstumpft, muss nicht mehr denken, googelt oder lässt sich von Katzenvideos berieseln. Also man verblödet einfach komplett.“

Systemschwächen: Wie „autonom“ sind autonome Autos eigentlich?

Das Vertrauen in die Sicherheit von autonomen Fahrzeugen scheint insgesamt noch eher gering ausgeprägt zu sein. Das verleitet die Teilnehmenden zu umfassenden Spekulationen: *„Wie berechenbar sind denn die Autos?“* und *„Wenn das System ausfällt und das Internet keine Verbindung hat?“* (Nico), *„Ob Fernsteuerung möglich ist?“* (Thorsten), *„Was passiert, wenn dieses System jetzt gehackt wird?“* und *„Können diese autonomen Autos auch wirklich autonom sein?“* (Bettina), *„Woher denn eigentlich die Aussage, dass das Ganze sicher sein soll?“* (Herta).

Hinter solchen Fragen und Aussagen steckt eine große Unsicherheit in Bezug auf die noch unbekannte Technologie und die Möglichkeit, dass mit ihr auch Gefahren verbunden sind. Gleichzeitig scheint den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Gruppendiskussionen derzeit überhaupt nicht klar, wer hinter der Entwicklung dieser Technologie steckt bzw. wer verantwortlich für die Sicherheit des Systems ist – wer würde bei einem Unfall haften? Wer übernimmt den Schaden? Und am wichtigsten: Wer übernimmt auch die ethische Verantwortung?

„Soziale und wirtschaftliche Folgen“

Mit der Auseinandersetzung um autonomes Fahren geht auch die Sorge einher, dass durch die Technologie Arbeitsplätze in unterschiedlichen Bereichen (Automobilindustrie, Taxi-Dienstleister, Lieferdienste etc.) abgebaut würden – damit ist auch die Vorstellung verbunden, dass es durch autonome Fahrzeuge weniger Vielfalt im Bereich der Automobillandschaft gäbe, *„wenn es nur dieses große Eine gibt“* (Bettina), dass autonomes Fahren letztendlich eine *„krassere Monopolisierung“* (Eddie) mit sich bringen würde.

31.3.4 Zusammenfassung

Die Aspekte, die in den Gruppendiskussionen im Hinblick auf autonomes Fahren thematisiert wurden, sind in einen sozio-technischen Zusammenhang eingebettet, der gleichzeitig negative und problemzentrierte Vorstellungen über eine künftige Gesellschaft enthüllt. Insgesamt stehen die Teilnehmenden dem autonomen Fahren eher ablehnend gegenüber. Zwar werden auch positive Aspekte der Technologie wahrgenommen. Diese sind jedoch weder in einen konkreten Nutzungszusammenhang eingebettet, noch mit positiven Vorstellungen über eine zukünftige Gesellschaft verbunden – zumindest nicht in dem Ausmaß wie mit negativen Vorstellungen.

Befürchtungen, die im Hinblick auf eine Zukunft mit autonomem Fahren geäußert werden, betreffen soziale Isolation, soziale und wirtschaftliche Folgen, Technikabhängigkeit, zunehmende Trägheit und den Druck, in einer vor allem auf Leistung ausgerichteten Gesellschaft mithalten zu müssen.

31.4 Fazit

Die Ergebnisse aus der quantitativen Befragung stellen die derzeit weit verbreitete Annahme, das autonome Fahren lasse eine generelle Offenheit und eine hohe Akzeptanz erwarten (vgl. [55], [56], [57]), infrage: Zwar zeigt sich eine solche Offenheit auch in unserer Untersuchung dort, wo nicht weiter spezifiziert wird, was ein autonomes Fahrzeug ist. Werden den Befragten jedoch konkrete Anwendungsfälle (Use-Cases) des autonomen Fahrens vorgestellt, fallen die Wertungen deutlich negativer aus. Vor allem die Bewertungen in Bezug auf das Vehicle-on-Demand lassen vermuten, dass einige Ausprägungen des autonomen Fahrens derzeit noch relativ „weit weg“ sind von konkreteren Vorstellungen zu

einem Fahrzeug, aber auch von Vorstellungen zur Art der Fortbewegung. Die negative Bewertung lässt sich u. a. damit erklären, dass sich die Menschen möglichen Risiken und Gefahren, die im Zusammenhang mit einem Vehicle-on-Demand auftreten könnten, eher „ausgesetzt“ fühlen, als dass sie diese bewusst „steuern“ können – denn selbst steuern ist bei einem solchen Fahrzeug ja gar nicht mehr möglich (zum Thema Risikobewertung s. auch Kap. 30). Insgesamt ist derzeit fraglich, ob sich die meisten Menschen überhaupt etwas unter „autonomen Fahren“ vorstellen können – immerhin 44 Prozent der Befragten in der quantitativen Erhebung haben angegeben, nichts über das autonome Fahren zu wissen. Dies zeigt deutlich, dass das Thema bei Weitem noch nicht überall angekommen ist. Die Ergebnisse können auch als Hinweis verstanden werden, künftig stärker nutzungs- und anwendungsbezogene Untersuchungen zum autonomen Fahren durchzuführen.

Besonders die negativen Assoziationen mit dem autonomen Fahren bzw. dem autonomen Fahrzeug lassen darüber hinaus erahnen, dass eine *nutzenorientierte* Betrachtung auch spezifische *Nutzergruppen* adressieren muss. So sollten Szenarien, mit denen gearbeitet wird, noch stärker die Lebenswelt und das Relevanzsystem der unterschiedlichen Nutzerinnen und Nutzer berücksichtigen. Klar wurde in diesem Zusammenhang zumindest, dass das Vertrauen gegenüber der noch relativ unbekannten Technologie derzeit eher gering ausgeprägt ist – dass autonome Fahrzeuge überhaupt sicher sein können, wird in Zweifel gezogen. Gleichzeitig gibt es momentan weder eine konkrete Vorstellung davon, was die Technologie leisten kann, noch davon, wer hinter der Entwicklung steht und im Zweifelsfall die Verantwortung, u. a. bei möglichen Schäden, übernehmen würde.

Die vorliegenden Ausführungen haben vor allem den „subjektiv gemeinten Sinn“ bzw. das reflexive oder theoretische Wissen ([54], S. 40 ff., [58], S. 10 ff.) des autonomen Fahrens, aber auch der Autonutzung in den Blick genommen: Ziel war dabei, die reflexive Auseinandersetzung, also die Motive der handelnden Personen herauszuarbeiten und zu fragen: Welchen Sinn macht die Autonutzung aus subjektiver Perspektive, was denken sich die Menschen dabei, welche Intentionen liegen ihrem Handeln zugrunde? Diese Sinnebene bildet das „Orientierungsschema“ der handlungsleitenden Wissensstruktur. In künftigen empirischen Arbeiten wird es auch notwendig sein, den Orientierungsrahmen, d. h. die Struktur des Handelns zu entschlüsseln und zu fragen, wie die Praxis der Autonutzung milieu- und kulturspezifisch hergestellt wird.

Ob durch das autonome Fahren ein fundamentaler Wandel im System der Automobilität ausgelöst werden wird, ist derzeit noch kaum abzusehen – bisher deutet wenig darauf hin, dass die Hegemonie der Autonutzung ernsthaft gefährdet wäre. Nichtsdestotrotz könnte es letztendlich gerade eine neue Technologie wie das autonome Fahren sein, die unser Mobilitätssystem nachhaltig und unumkehrbar transformiert – dazu der Soziologe John Urry: „Just as the internet and the mobile phone came from ‚nowhere‘, so the tipping point here will emerge unpredictably, probably from a set of technologies or firms or governments not currently a center of the mobility industry and culture.“ ([59], S. 272)

Literatur

1. Anker, S.: Ist das die Zukunft unserer Mobilität? Die Welt. <http://www.welt.de/debatte/kommentare/article128675822/Ist-das-die-Zukunft-unserer-Mobilitaet.html> (2014). Zugegriffen: 30. September 2014
2. Heise online: Autonome Autos machen Privat-Pkw überflüssig. <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Autonome-Autos-machen-Privat-Pkw-ueberfluessig-1943508.html> (2014). Zugegriffen: 30. September 2014
3. Der Stern/DPA: So sollen Roboter-Autos den Verkehr revolutionieren. [stern.de http://www.stern.de/auto/news/google-car-so-sollen-roboter-autos-den-verkehr-revolutionieren-2122143.html](http://www.stern.de/auto/news/google-car-so-sollen-roboter-autos-den-verkehr-revolutionieren-2122143.html) (2014). Zugegriffen: 30. September 2014
4. Hucko, M.: Carsharing mit selbst fahrenden Autos: Daimler eifert Google nach. Spiegel Online <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/daimler-autobauer-plant-car-sharing-mit-autonom-fahren-den-smarts-a-980962.html#ref=rss> (2014). Zugegriffen: 30. September 2014
5. Sheller, M.: The Emergence of New Cultures of Mobility: Stability, Openings, and Prospects. In: R. Kemp et al. (Hrsg.) *Automobility in transition? A socio-technical analysis of sustainable transport*, S. 180–202. Routledge, London (2011)
6. Gardner, B., Abraham, C.: What drives car use? A grounded theory analysis of commuters' reasons for driving. *Transportation Research Part F* 10, 187–200 (2007)
7. Ladd, B.: *Autophobia. Love and Hate in the Automotive Age*. The University of Chicago Press, Chicago (2008)
8. Miller, D.: *Car Cultures*. Berg, Oxford / New York (2001)
9. Curtis, C., Low, N.: *Institutional Barriers to Sustainable Transport*. Ashgate, Farnham (2012)
10. Sandoval, J.S.O., Cervero, R., Landis, J.: The transition from welfare-to-work: How cars and human capital facilitate employment for welfare recipients. *Applied Geography* 31, 352–362 (2011)
11. Urry, J.: The 'System' of Automobility. *Theory, Culture & Society* 21, 25–39 (2004)
12. Geels, F.: The Dynamics of Transitions in Socio-technical Systems : A Multi-level Analysis of the Transition Pathway from Horse-drawn Carriages to Automobiles. *Technology Analysis & Strategic Management* 17, 445–476 (2005)
13. Sheller, M., Urry, J.: The City and the Car. *International Journal of Urban and Regional Research* 24, 737–757 (2000)
14. Stotz, G.: The Colonizing Vehicle. In: Miller, D.: *Car Cultures*, S. 223–244. Berg, Oxford / New York (2001)
15. Sheller, M.: Automotive Emotions: Feeling the Car. *Theory, Culture & Society* 21, 221–242 (2004)
16. Dant, T.: The Driver-car. *Theory, Culture & Society* 21, 61–79 (2004)
17. Thrift, N.: Driving in the city. *Theory, Culture & Society* 21, 41–59 (2004)
18. Bergstad, C.J., Gamble, A., Hagman, O., Polk, M., Gärling, T., Olsson, L.E.: Affective-symbolic and instrumental-independence psychological motives mediating effects of socio-demographic variables on daily car use. *Journal of Transport Geography* 19, 33–38 (2011)
19. Williams, A.M., Shaw, G.: Future play: tourism, recreation and land use. *Land Use Policy* 265, 5326–5335 (2009)
20. Macintyre, S., Ellaway, A., Der, G., Ford, G., Hunt, K.: Do housing tenure and car access predict health because they are simply markers of income or self esteem? A Scottish study. *Epidemiol Community Health* 52, 657–664 (1998)
21. Brownstone, D., Small, K.A.: Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations. *Transportation Research Part A: Pol. Pract.* 39, 279–293 (2005)
22. Bamberg, S., Ajzen, I., Schmidt, P.: Choice of travel mode in the theory of planned behaviour: the role of past behaviour, habit, and reasoned action. *Basic and Applied Social Psychology* 25, 175–188 (2003)

23. Li, Z.L., Hensher, D.A.: Congestion charging and car use: A review of stated preference and opinion studies and market monitoring evidence. *Transport Policy* 20, 47–61 (2012)
24. Litman, T.: Build for comfort, not just speed: valuing service quality impacts in transportation planning. Victoria Transport Policy Institute (2008)
25. Newman, P., Kenworthy, J.: Urban Design to Reduce Automobile Dependence. *Opolis* 2, 35–52 (2006)
26. Ewing, R.; Cervero, R.: Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association* 76, 265–294 (2001)
27. Mokhtarian, P. L., Salomon, L.: How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations. *Transport Research Part A* 35, 695–719 (2001)
28. Steg, L., Vlek, C., Slotegraaf, G.: Instrumental-reasoned and symbolic-affective motives for using a motor car. *Transportation Research Part F* 4, 151–169 (2001)
29. Steg, L.: Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. *Transportation Research A* 39, 147–162 (2005)
30. Gatersleben, B.: Psychological Motives for Car Use. In: T. Gärling et al. (eds.), *Handbook of Sustainable Travel*, S. 85–94. Springer, Dodrecht (2013)
31. Gatersleben, B., Uzell, D.: The journey to work: Exploring commuter mood among driver, cyclists, walkers and users of public transport. *Environment and Behaviour* 39, 416–431 (2007)
32. Ellaway, A., Macintyre, S., Hiscock, R., Kearns, A.: In the driving seat: psychological benefits from private motor vehicle transport compared to public transport. *Transportation Research Part F* 6, 217–231 (2003)
33. Lois, D, López-Sáez, M.: The relationship between instrumental, symbolic and affective factors as predictors of car use. *Transportation Research Part A* 43, 790–799 (2009)
34. Steg, L.; Vertoolen, L. G.J.: Affective motives for car use. In: *European Transport Conference: Transport, Planning, Policy and Practice*, Cambridge, London (1999)
35. Kent, J.: Secured by automobility: why does the private car continue to dominate transport practices? Dissertation, University of New South Wales, Australia (2013)
36. Freudendahl-Pedersen, A.: *Mobility in Daily Life – Between Freedom and Unfreedom*. Ashgate, Farnham (2009)
37. Laurier, E., Lorimer, H., Brown, B., Jones, O., Juhlin, O., Noble, A., Perry, M., Pica, D., Sormani, P., Strebel, I., Swan, L., Taylor, A., Watts, L., Weilenmann, A.: Driving and “passenger-ing”: Notes on the ordinary organization of car travel. *Mobilities* 3, 1–23 (2008)
38. Schuitema, G., Anable, J., Skippon, S., Kinnear, N.: The role of instrumental, hedonic and symbolic attributes in the intention to adopt electric vehicles. *Transportation Research Part A* 48, 39–49 (2013)
39. Freund, P., Martin, G.: The social and material culture of hyperautomobility: “Hyperauto”. *Bull. Sci. Technol. Soc.* 29, 476–482 (2009)
40. Sheller, M., Urry, J.: The new mobilities paradigm. *Environ. Plann. A* 38, 207–226 (2006)
41. Gilroy, P.: Driving While Black. In: Miller, D.: *Car Cultures*, S. 81–104. Berg, Oxford/New York (2001)
42. Dowling, R.: Cultures of mothering and car use in suburban Sydney: a preliminary investigation. *Geoforum* 31, 435–453 (2000)
43. Augé, M.: *Non-Places. Introduction to an Anthropology of Supermodernity*. Verso, London (1995)
44. Baumann, Z.: *44 Letters from the Liquid Modern World*. Polity Press, Cambridge (2010)
45. Laurier, E.: Doing office work on the motorway. *Theory, Culture, Society* 21, 261–277 (2004)
46. Laurier, E., Dant, T.: What We Do Whilst Driving: Towards the Driverless Car. In: Grieco, M., Urry, J.: *Mobilities: New perspectives on transport and society*, S. 223–243. Ashgate, New York / London (2012)

47. Mann, E. & Abraham, C.: The role of affect in UK commuters' travel mode choices: An interpretative phenomenological analysis. *British Journal of Psychology* 97, 155–176 (2006)
48. Jain, J., Lyons, G.: The gift of travel time. *Journal of Transport Geography* 16, 81–89 (2008)
49. Jones, P., Thoreau, R., Massot, M.-H., Orfeuill, J.-P.: The Impact of Differences in Commuting Duration on Family Travel and Activity Patterns in the London and Paris Regions. In: Grieco, M., Urry, J.: *Mobilities: New perspectives on transport and society*, S. 179–205. Ashgate, New York / London (2012)
50. Kuhnimhof, T., Zumkeller, D., Chlond, B.: Who Made Peak Car, and How? A Breakdown of Trends over Four Decades in Four Countries. *Transport Reviews* 33, 325–342 (2013)
51. Kent, J.: Driving to save time or saving time to drive? The enduring appeal of the private car. *Transportation Research Part A*. 65, 103–115 (2014)
52. Witt, H.: Introspektion. In: Mey, G., Mruck, K. *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*, S. 491–505. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2010)
53. Kleinig, G.: *Lehrbuch Entdeckende Sozialforschung. Von der Hermeneutik zur qualitativen Heuristik*. Psychologie Verlags Union, Weinheim (1995)
54. Bohnsack, R., Marotzki, W., Meuser, M. (Hrsg.): *Hauptbegriffe Qualitativer Sozialforschung*. Barbara Budrich, Opladen & Farmington Hills (2011)
55. Continental AG: Continental Mobilitätsstudie. http://www.continental-corporation.com/www/download/presseportal_com_de/allgemein/automatisiertes_fahren_de/ov_mobilitaetsstudie_2013/download_channel/praes_mobilitaetsstudie_de.pdf (2013) Zugriffen: 30.09.2014
56. AutoScout24 GmbH: Unser Auto von morgen 2013/14 <http://ww2.autoscout24.de/special/unserauto-von-morgen--2013-14/was-wuenschen-sichdie-europaeer-vom-auto-von-morgen/4319/392974/> (2013) Zugriffen: 30.09.2014
57. AutoScout24 GmbH: Unser Auto von morgen. Studie zu den Wünschen der Europäer an das Auto von morgen about.autoscout24.com/de-de/au-press/2012_as24_studie_auto_v_morgen_en.pdf (2012) Zugriffen: 30.09.2014
58. Bohnsack, R., Nentwig-Gesemann, I., Nohl, A.: *Dokumentarische Methode und ihre Forschungspraxis*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2013)
59. Urry, J.: Climate change, travel and complex futures. *The British Journal of Sociology* 59, 261–279 (2008)

David M. Woisetschläger

Inhaltsverzeichnis

32.1 Einleitung 710

32.2 Theoretische Grundlagen 711

 32.2.1 Akzeptanzforschung zu technologiemedierten Dienstleistungen
 und Dienstleistungsrobotern 711

 32.2.2 Akzeptanzforschung zum automatisierten Fahren 713

32.3 Konzeptionelles Modell 714

 32.3.1 Markenstärke und weitere Einflussfaktoren als Treiber der Kaufentscheidung ... 714

 32.3.2 Zur Bedeutung von Markenallianzen im Kaufverhalten 716

 32.3.3 Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens
 und ihre Bedeutung für die Kaufbereitschaft 716

32.4 Beschreibung der Erhebung 717

32.5 Studie 1 717

 32.5.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte 717

 32.5.2 Ergebnisse 719

32.6 Studie 2 722

 32.6.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte 722

 32.6.2 Ergebnisse 722

32.7 Studie 3 724

 32.7.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte 724

 32.7.2 Ergebnisse 725

32.8 Zusammenfassung und Ausblick 727

 Literatur 729

D. M. Woisetschläger (✉)
TU Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, Deutschland
d.woisetschlaeger@tu-braunschweig.de

32.1 Einleitung

Die vom rasanten Fortschritt in der Informationstechnologie [10], [11] getriebene Entwicklung von automatisierten, selbstfahrenden Fahrzeugen ist eines der größten unternehmerischen Vorhaben der Automobilindustrie im 21. Jahrhundert. Die Automobilhersteller und ihre Zulieferer versprechen sich von den technologischen Innovationen auf dem Gebiet des automatisierten Fahrens einen positiven Beitrag zur Profitabilität von Fahrzeugen [46], steigert die Integration als optionales Ausstattungsmerkmal doch den Ergebnisbeitrag jedes verkauften Fahrzeugs. Darüber hinaus legen die automatisierten Fahrfunktionen die Grundlage für neue Geschäftsmodelle wie beispielsweise erweiterte Navigationslösungen. Branchenexperten äußern sich eher zurückhaltend auf die Frage, wann das voll-automatisiert fahrende Automobil für den Massenmarkt verfügbar ist, meist wird die Mitte des 21. Jahrhunderts als realistische Zielmarke angepeilt [42], [45]. Tatsächlich verläuft die Einführung automatisierter Fahrfunktionen eher graduell, so werden bereits seit einigen Jahren Assistenzfunktionen wie die automatische Distanzregelung oder Spurassistenten angeboten [43], [50], [64], [66], die sich bereits reger Nachfrage erfreuen. Zum Teil vielversprechende Marktprognosen suggerieren darüber hinaus eine grundsätzliche Offenheit der Kunden gegenüber selbstfahrenden Fahrzeugen [51]. Neben den etablierten Akteuren aus der Automobilbranche setzen daher auch Technologiekonzerne wie Google große Erwartungen in das prognostizierte Potenzial des automatisierten Fahrens [36], [37], [43].

Das Eintreten von Technologiekonzernen in den Automobilmarkt stellt für die etablierten Hersteller durchaus eine Bedrohung dar [58], erfordern die Funktionen des automatisierten Fahrens doch andere organisationale Fähigkeiten im Bereich der Informationstechnologie und schnellere Innovationszyklen – beides Domänen, die eher von Technologiekonzernen als von Automobilherstellern verkörpert werden. Neuste Branchenstudien zeigen sogar, dass Google als neuer Marktteilnehmer diejenige Marke ist, die mit Abstand am meisten mit selbstfahrenden Automobilen assoziiert wird [37]. Darüber hinaus erhalten sogar fiktive Fahrzeuge von Technologiekonzernen in Konsumentenstudien bereits ähnlich hohe Erwägungswerte wie etablierte Automobilhersteller [37]. Daher ist die Automobilbranche einerseits aufgrund des Bedrohungspotenzials der möglichen neuen Marktteilnehmer in Aufruhr und um die Verteidigung ihrer derzeitigen Marktpositionen bemüht. Andererseits versprechen Kooperationen mit Technologiekonzernen die Möglichkeit der Differenzierung ihrer Marken vom Wettbewerb und dies insbesondere dann, wenn die Partnerschaften selektiv oder exklusiv sind. Meldungen über Kooperationsgespräche wie zwischen Audi und Apple weisen in diese Richtung.

Parallel zu dieser Entwicklung wird die Rolle der Marke als kritischer Erfolgsfaktor in der Automobilindustrie in zahlreichen Studien hinterfragt. Diese gehen davon aus, dass die symbolische Bedeutung von Automobilen rückläufig ist und Produkte wie Smartphones zumindest in jüngeren Kundensegmenten das Auto in seinem Stellenwert verdrängen [12]. Die Verbreitung und zunehmende Popularität von zugangsbasierten Mobilitätsdienstleistungen wie dem Carsharing implizieren zudem einen Trend zu einer zunehmend utilitaristischen Perspektive auf Automobile [57]. Trotzdem bleiben zahlreiche Faktoren, die

zur großen Bedeutung der Markenstärke im Automobilbereich führen, unabhängig von potenziellen Veränderungen in der Präferenzhierarchie von Produktkategorien im Zeitverlauf bestehen. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass die Bedeutung der Marke als Einflussgröße der Kaufentscheidung generell hoch ist, wenn der Kauf oder die Nutzung mit einem hohen Risiko, Informationsasymmetrie und symbolischer Bedeutung verbunden wird [34].

In der bestehenden wissenschaftlichen Literatur existieren umfassende konzeptionelle Modelle, die eine Bewertung der relativen Bedeutung der Marke als Einflussfaktor des Kaufverhaltens von Konsumgütern ermöglichen. Im vorliegenden Spitzentechnologiekontext ist jedoch unklar, welche Bedeutung dem Markenwissen in der Bewertung von Produkten zukommt. In gleicher Weise besteht in der Marketingforschung ein umfassendes Verständnis über die Wirkung unterschiedlicher Markenstrategien wie die Nutzung von Markenerweiterungen (beispielsweise bei der Einführung neuer Dienstleistungen), die Wirkung von Markenallianzen [68] und zum Einfluss von Neuprodukteinführungen auf die Wahrnehmung der Dachmarke [2]. Untersuchungen zur Rolle der Marke für die Vermarktung von Hochtechnologieprodukten wie automatisierten Fahrtechnologien sind jedoch nicht vorhanden.

Vor diesem Hintergrund leistet das vorliegende Kapitel erstens durch die Entwicklung eines konzeptionellen Rahmens, in dem die relevanten Treiber und Konsequenzen der Kaufintention unter besonderer Berücksichtigung markenpolitischer Instrumente im Kontext des automatisierten Fahrens strukturiert werden, einen Beitrag zur bestehenden Forschung. Zweitens wird die relative Bedeutung der Markierung automatisierter Fahrtechnologien durch Automobilhersteller oder Technologiekonzerne vergleichbarer Markenstärke empirisch untersucht. Drittens wird analysiert, wie die Einführung von automatisierten Fahrtechnologien durch eine Markenallianz aus Automobilhersteller und Technologiekonzern wahrgenommen wird. Viertens wird untersucht, wie potenzielle Kunden alternative Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens beurteilen. Basierend auf den Ergebnissen der empirischen Studien werden Implikationen für die Unternehmenspraxis und die Wissenschaft abgeleitet.

32.2 Theoretische Grundlagen

32.2.1 Akzeptanzforschung zu technologiemediierten Dienstleistungen und Dienstleistungsrobotern

Das vergleichsweise neue Forschungsfeld des assistierten und automatisierten Fahrens wurde bislang vornehmlich hinsichtlich technologischer, rechtlicher, politischer und ethischer Fragestellungen untersucht (vgl. beispielsweise [5], [7], [14], [26], [27], [28], [30], [35], [41], [48], [52], [55], [62]). Automatisiertes Fahren wird definiert als Übergabe der Fahrkontrolle vom Fahrer an das Fahrzeug [63], wobei das Ausmaß des automatisierten Fahrens vom Umfang der Fahrzeugautomatisierung abhängt. Die US-amerikanische

National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) definiert fünf Stufen des automatisierten Fahrzeugs basierend auf der Verteilung der Kontrolle zwischen Fahrer und Fahrzeug. In der höchsten Stufe vollzieht das Fahrzeug alle Fahrfunktionen, überwacht die Sicherheit und die Umgebungsbedingungen während der gesamten Fahrt und entbindet somit den Fahrer von jeglichen Aufgaben [63]. Diese Vision des vollständigen automatisierten Fahrens wird hinsichtlich des Geschäftspotenzials, der Verkehrssicherheit und der Verkehrssteuerung für sehr vielversprechend gehalten [21]. Daher investieren neben den Automobilherstellern auch Technologiekonzerne wie Apple oder Google in die kontinuierliche Verbesserung von Assistenz- und Automatisierungstechnologien. Während diese Entwicklung aus Konsumentensicht ebenfalls viele positive Aspekte beinhaltet, legen erste wissenschaftliche Untersuchungen jedoch nahe, dass Konsumenten auch starke Vorbehalte gegenüber automatisierten Fahrtechnologien haben [25].

Auch wenn in der wissenschaftlichen Literatur relativ wenige Arbeiten existieren, welche die konsumentenseitige Wahrnehmung von automatisierten Fahrtechnologien untersuchen (beispielsweise [51]), lassen sich doch aus anderen Kontexten wie beispielsweise Studien zur Akzeptanz von Selbstbedienungstechnologien und Dienstleistungsrobotern Nutzenbestandteile und Barrieren identifizieren, die aus Konsumentensicht mit der Verlagerung der Kontrolle vom Menschen hin zur Technologie verbunden sind.

Die meisten Forschungsarbeiten zur Kundenakzeptanz von technologiebasierten Innovationen nutzen das „Technology Acceptance Model“ in einer der zahlreichen publizierten Varianten [8], [15], [16], [17], [47], [60], [65], [67]. Vier zentrale Einflussfaktoren werden als Antezedenzien von Kundenakzeptanz und dem daraus folgenden Verhalten konzeptualisiert. Der erste Faktor, die Leistungserwartung, bezieht sich auf den wahrgenommenen Nutzen der Technologie. Die zweite Variable, der wahrgenommene Aufwand, kann als Einfachheit der Nutzung der Innovation verstanden werden [65]. Der dritte Faktor bezieht sich auf soziale Einflüsse bezüglich der Nutzung der innovativen Technologie, welche die Kundenakzeptanz und Adoption der neuen Technologie beeinflussen können. Viertens leisten unterstützende Faktoren wie Infrastruktur oder persönliche Beratung einen positiven Beitrag zur Akzeptanz innovativer Angebote. Einer der zentralen Erfolgsfaktoren für die Akzeptanz von Technologieinnovationen ist jedoch die Wahrnehmung der Verhaltenskontrolle. Schon bei interaktiven oder ferngesteuerten Dienstleistungen, deren Nutzung eine eingeschränkte und indirekte menschliche Interaktion impliziert, wurde der wahrgenommene Kontrollverlust als Faktor identifiziert, der negativ auf die Kundenakzeptanz wirkt [70], [71]. Diese Dienstleistungen zeichnen sich dadurch aus, dass der Kundenkontakt des Anbieters überwiegend oder sogar vollständig durch einen technologischen Mediator (beispielsweise ein Web-Interface) hergestellt wird. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass dem Vertrauen in technologiemediierte Dienstleistungen eine besondere Bedeutung zukommt, insbesondere dann, wenn die Nutzung der Dienstleistung als risikobehaftet wahrgenommen wird [69], [70]. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Forschung zur Akzeptanz von Technologieinnovationen und technologiemediierten Dienstleistungen die Bedeutung des wahrgenommenen Nutzens, Aufwands, sozialer Einflüsse und unterstützender Faktoren wie der wahrgenommenen Verhaltenskontrolle

bestätigt. Darüber hinaus ist das Vertrauen in die Leistung und den Anbieter eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung innovativer Leistungen.

Im Gegensatz zur bereits gut etablierten Forschung zur Akzeptanz von Technologieinnovationen und technologiemediierten Dienstleistungen befindet sich die Forschung zur Kundenwahrnehmung von Dienstleistungsrobotern noch in einem frühen Stadium. Bestehende Studien befassen sich schwerpunktmäßig mit dem Einsatz von Robotern im Haushalt („Smart Home“, vgl. beispielsweise [31], [49]) und im Gesundheitsbereich [38]. Die bisherigen Forschungsergebnisse legen nahe, dass Menschen Roboter bevorzugen, die als vertrauenswürdige, beherrschbare und auf Interaktion und Kooperation fokussierte Unterstützer agieren, statt vollkommen eigenständig handelnde Roboter [23]. In gleicher Richtung weisen die Forschungsergebnisse zu Begleitrobotern darauf hin, dass die Nutzer diese primär als Assistenz- und Dienstmaschinen sehen werden und nur eine Minderheit der befragten Stichprobe sie als Gefährten oder gar als Freunde betrachten [18]. Die Forschungsarbeiten zu Begleitrobotern empfiehlt, dass die Rolle, das äußere Erscheinungsbild und das Verhalten des Roboters besser an die menschlichen Bedürfnisse angepasst werden sollten [9]. Diese Schlussfolgerungen lassen sich auf die Fragestellung übertragen, in welcher Beziehung automatisierte Fahrroboter zu ihrem menschlichen Gegenpart stehen sollten [54].

Ein weiterer zentraler Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion ist die wahrgenommene Autonomie der Konsumenten [4], [29]. Während die Rolle der Autonomie bereits in einigen Studien direkt oder indirekt angesprochen wurde, könnte ihre kritische Bedeutung für die Akzeptanz automatisierter Technologien in den untersuchten Fällen noch nicht vollständig erfasst sein. Die Beschränkung oder vollständige Aufhebung der Autonomie von Individuen könnte zu Reaktanz führen, einer negativen psychologischen und gegensätzlichen Verhaltensreaktion von Konsumenten als Reaktion auf eine empfundene Beschränkung ihrer individuellen (Entscheidungs-)Freiheit [6], [44]. Automatisierte Fahrsysteme könnten als Bedrohung der Autonomie des Fahrers wahrgenommen werden. Konsumentenseitige Reaktanz könnte sich dann in einer Verweigerung der Nutzung und niedrigen Einbauraten optional angebotener Systeme auswirken. Aus gegenwärtiger Sicht erscheint zumindest unklar, ob Konsumenten bereit sind, einen Kontrollverlust durch die Übergabe von Entscheidungskompetenz an eine Maschine zu tolerieren [56].

Im nächsten Abschnitt werden die bisherigen Ergebnisse von Studien über die konsumentenseitige Wahrnehmung des automatisierten Fahrens zusammengefasst.

32.2.2 Akzeptanzforschung zum automatisierten Fahren

Bislang existieren erst vergleichsweise wenige Studien zur Konsumentenwahrnehmung des automatisierten Fahrens. Da aufgrund des Neuigkeitsgrades der technologischen Entwicklung das Wissen der Konsumenten über das automatisierte Fahren begrenzt ist, analysiert eine aktuelle Studie die Leserkommentare zu 15 verschiedenen Zeitungsartikeln über das automatisierte Fahren in Deutschland und den USA [25]. Die Ergebnisse des Beitrags liefern Hinweise auf das implizierte Nutzenversprechen einer verbesserten Flexi-

bilität und eines erhöhten Komforts. Darüber hinaus zeigen sich kritische Kommentare, die sich auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit der automatisierten Fahrtechnologie beziehen. Die Kommentare der US-Leser weisen in besonderem Maße negative Konnotationen bezogen auf die Beschränkung der individuellen Freiheit auf und deuten somit auf die hohe Relevanz des Autonomiebedürfnisses der Konsumenten hin.

Eine zweite Studie behandelt den Einsatz automatisierter Technologien in zwei verschiedenen Kontexten, und zwar der automatisierten Diagnose im Gesundheitsbereich und des automatisierten Fahrens. Der Beitrag liefert Anhaltspunkte dafür, dass der Marke des Anbieters eine bedeutende Rolle zur Reduktion des wahrgenommenen Risikos zukommen könnte [13]. In einer weiteren Studie werden vier verschiedene Szenarien zukünftiger Mobilität unter Mitwirkung von Experten von Fahrzeugherstellern, Behörden, Wissenschaft und Umweltschutzgruppen entwickelt [19]. Zwei der vier Szenarien beziehen sich auf das automatisierte Fahren und unterscheiden hierbei zwischen dem Besitz und dem dienstleistungsbasierten Zugang zu automatisierten Fahrzeugen. Beide Szenarien weisen eine schlechtere Beurteilung der Leistung aus Individualperspektive auf, während Vorteile auf der systemischen Ebene bestehen.

Eine erste Studie, die sich mit der Quantifizierung der Bedeutung psychologischer Treiber der Nutzungs- und Kaufabsicht beschäftigt, stellt basierend auf einer Stichprobe von 421 französischen Konsumenten positive Werte für die Verhaltensabsicht fest [51]. Es zeigen sich signifikant positive Einflüsse der generellen Einstellung gegenüber dem automatisierten Fahren, der Kundenakzeptanz und dem empfundenen Neuigkeitsgrad auf die Verhaltensabsicht. Darüber hinaus zeigt sich, dass männliche Befragte eine vergleichsweise höhere Nutzungsintention aufweisen. Diese Beobachtung steht im Einklang mit weiteren Forschungsarbeiten zur Adoptionsbereitschaft technologischer Innovationen, die üblicherweise eine höhere Bereitschaft zur frühzeitigen Adoption bei männlichen Konsumenten feststellt.

Der vorliegende Beitrag baut auf diesen Ergebnissen auf und konzeptualisiert ein Untersuchungsmodell, das die in diesem Abschnitt aufgeführten Schlüsselvariablen, die Rolle der Marke und die Bedeutung verschiedener Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens umfasst. Im nächsten Abschnitt werden die Effekte der Markenstärke, der markenpolitischen Option einer Markenallianz und die Rolle der verschiedenen Anwendungsfälle zur Erklärung der Kaufbereitschaft hergeleitet.

32.3 Konzeptionelles Modell

32.3.1 Markenstärke und weitere Einflussfaktoren als Treiber der Kaufentscheidung

Aus akademischer und Praxissicht ist die Markenstärke, definiert als aus der Marke resultierender Zusatznutzen eines Produkts [20], ein wichtiger Wettbewerbsvorteil. Unternehmen können aus starken Marken Wettbewerbsvorteile ziehen, da diese die Möglichkeit zur Differenzierung bieten, mit einer höheren Kundenloyalität einhergehen und die Mög-

lichkeit zur Abschöpfung eines Preis-Premiums bieten [39]. Starke Marken unterscheiden sich messbar im konsumentenseitigen Markenwissen. Nach Keller [33] besteht das Markenwissen aus zwei Dimensionen: der Bewusstseinsgegenwärtigkeit einer Marke (*Brand Awareness*) und dem Markenimage. Die Bewusstseinsgegenwärtigkeit der Marke bezeichnet die Stärke der Verankerung einer Marke im Gedächtnis und die Wahrscheinlichkeit und Leichtigkeit, mit der die Marke unter verschiedenen Umständen erinnert oder wiedererkannt wird [59]. Das Markenimage ist definiert als die Wahrnehmung einer Marke in Form unterschiedlicher Assoziationen, die im Gedächtnis der Konsumenten mit dem Markennamen verbunden sind [33]. Die Vorteilhaftigkeit, Stärke und Einzigartigkeit dieser Assoziationen ermöglichen eine differenzierte Positionierung der Marke im Gedächtnis der Konsumenten, aus der die anbieterseitig intendierten positiven Konsequenzen resultieren können. Während starke Marken somit generell hilfreich für die Vermarktung von Produkten und Dienstleistungen sind, variiert deren Bedeutung jedoch branchenabhängig und ist für die Vermarktung von Automobilen typischerweise hoch [22]. Im Allgemeinen hängt die Bedeutung der Marke für die Kaufentscheidung stark von ihrem Beitrag als risikoreduzierender Faktor, ihrer Funktion zur Erhöhung der Informationseffizienz und ihrem symbolischen Wert ab. Da der Kauf eines Neuwagens den Charakter einer extensiven Kaufentscheidung hat, mit relativ hohen Kosten und einer umfangreichen Informationsphase verbunden und das Auto immer noch ein wichtiges Statussymbol ist, kann von einem starken Einfluss der Marke auf das Kaufverhalten ausgegangen werden.

Ausgehend von der ersten empirischen Evidenz für die Risikoreduktionsfunktion starker Marken im Kontext des automatischen Fahrens [13] lässt sich auf Grundlage der genannten Markenfunktionen ein positiver Einfluss starker Marken auf die Akzeptanz automatisierter Fahrtechnologien schließen. Das Wissen über und die Erfahrung der Konsumenten mit automatisiertem Fahren ist gering. In Verbindung mit den zu erwartenden zusätzlichen Anschaffungskosten, um Fahrzeuge zum automatisierten Fahren zu befähigen, scheint es wahrscheinlich, dass Konsumenten die Kaufentscheidung als risikoreich einschätzen. Starke Marken können einen Beitrag dazu leisten, die Wahrnehmung dieses Kaufrisikos abzusenken.

Über die Unterscheidung zwischen starken und schwachen Marken von Automobilherstellern und Technologiekonzernen hinaus, die ein automatisiertes Fahrzeug einführen könnten, werden einige weitere Einflussfaktoren auf Basis der oben dargestellten Literaturquellen berücksichtigt. Genauer gesagt werden das funktionale Vertrauen, die wahrgenommene Vorteilhaftigkeit des Angebots, das empfundene Preis-/Leistungsverhältnis und der symbolische Nutzen eines automatisierten Fahrzeugs als relevante Treiber in ein konzeptionelles Modell zur Erklärung der Kaufbereitschaft integriert. Es wird weiter angenommen, dass diese Faktoren durch die Wahrnehmung der Sicherheit des Systems, der wahrgenommenen Autonomie, der Bedenken bezüglich des Schutzes der Privatsphäre [3] sowie die Markeneinstellung beeinflusst werden.

Zur Kontrolle von Einstellungsunterschieden zwischen Konsumenten, die unabhängig vom zugewiesenen Szenario bestehen, werden die generelle Affinität der Individuen, neue Produkte und Dienstleistungen frühzeitig zu adoptieren, ihre Autonomiepräferenz und die im Besitz befindliche Fahrzeugmarke berücksichtigt.

32.3.2 Zur Bedeutung von Markenallianzen im Kaufverhalten

Neben der naheliegenden Option der Einführung automatisierter Fahrfunktionen unter der Marke eines einzelnen Automobilherstellers oder eines Technologiekonzerns, sind Markenallianzen eine weitere erwägenswerte Option. Markenallianzen werden in einer Vielzahl von Branchen genutzt [40]. Eines der zentralen Ergebnisse der Forschung zu Markenallianzen ist, dass unbekannte oder unbeliebte Marken von einer Allianz mit einer bekannten und beliebten Marke profitieren können [53], [61]. Markenallianzen setzen sich dabei aus mindestens zwei Objekten zusammen, eine Unterscheidung erfolgt hierbei zwischen horizontalen und vertikalen Markenallianzen [1]. Vertikale Markenallianzen werden zwischen Akteuren auf nacheinander folgenden Stufen einer Wertschöpfungskette genutzt, so auch beispielsweise zwischen Intel als Lieferant von Prozessoren und Dell als Integrator von PCs. Im Unterschied hierzu gehören die Akteure horizontaler Markenallianzen einer Industrie- und Produktkategorie an (beispielsweise Häagen-Dazs und Baileys). Im vorliegenden Kontext erscheint eine vertikale Markenallianz zwischen einem Automobilhersteller und einem Technologiekonzern ein realistisches Szenario zu sein, da bereits zahlreiche Allianzen zwischen diesen Akteuren über die Medien bekannt gegeben wurden [32], [37]. Teil der empirischen Analyse ist daher die Untersuchung von Unterschieden im Niveau der Kaufbereitschaft, die aus dem (nicht) Vorhandensein einer Markenallianz zwischen einer starken (schwachen) automobilen Herstellermarke und einer starken Technologiemarken resultieren.

32.3.3 Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens und ihre Bedeutung für die Kaufbereitschaft

Die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) unterscheidet fünf Stufen des automatisierten Fahrzeugs basierend auf der Verteilung der Kontrolle zwischen Fahrer und Fahrzeug [63]. Zur Analyse möglicher Unterschiede in der Kaufbereitschaft, die aus verschiedenen Anwendungsfällen resultieren könnten, werden verschiedene Anwendungsfälle auf den Stufen vier und fünf betrachtet. So werden die Befragten der ersten Studie mit einem Autobahnpiloten konfrontiert, bei dem der Fahrer jederzeit als übergeordnete Instanz den Fahrvorgang übernehmen kann. Die zweite empirische Studie erweitert Studie 1 durch die Untersuchung der Effekte hypothetischer Markenallianzen. In Studie 3 werden zwei weitere Anwendungsfälle eingeführt. Das automatisierte Valet-Parken ist mit einem geringeren persönlichen physischen Risiko und ebenso mit geringerem Autonomieverlust verbunden. Der dritte Anwendungsfall steht auf der fünften Stufe der NHTSA-Typologie und ist somit vollautomatisiert und ohne Option für den Fahrer, manuell den Fahrvorgang vom Automaten zu übernehmen. Es kann vermutet werden, dass dieser dritte Anwendungsfall von den Probanden besonders kritisch bewertet wird, da er ein hohes Maß an wahrgenommenem persönlichem physischem Risiko und eine starke Beschränkung der persönlichen Autonomie beinhaltet.

32.4 Beschreibung der Erhebung

Das entwickelte Modell wird zur empirischen Untersuchung in eine Serie von drei Studien unterteilt. Die Daten wurden mittels einer Online-Befragung unter Mitgliedern eines Online-Panel-Anbieters erhoben. Die Stichprobe wurde unter Berücksichtigung der folgenden Anforderungen gebildet: Die Befragten mussten im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis sein und ein Fahrzeug besitzen. Die Stichprobe wurde so gezogen, dass sie bezogen auf Alter und Geschlecht der Verteilung der deutschen Bevölkerung zwischen 18 und 70 Jahren entspricht.

Vor der Konfrontation mit der jeweiligen Manipulation wurden die Probanden gebeten, Marke und Modell des Fahrzeugs zu nennen, welches sie überwiegend nutzen. Darüber hinaus wurden sie gebeten, ihr Involvement mit Automobilen und die Vertrautheit und Einstellung gegenüber der/den Marke(n), die im Szenario genutzt wurde(n), einzuschätzen. Jeder Proband wurde daraufhin per Zufallsgenerator einem einzigen Szenario zugewiesen. Die Studien 1 und 2 basieren auf dem Autobahnpiloten als automatisiertem Fahrsystem. Studie 3 untersucht genauer, wie Konsumenten alternative Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens bewerten (automatisiertes Valet-Parken, vollautomatisiertes Fahren ohne manuelle Fahrfunktion). Nach der Konfrontation der Probanden mit einem der Szenarien wurden sie gebeten, ihre Kaufbereitschaft für das optional angebotene automatisierte Fahrsystem anzugeben. Anschließend erfolgte eine Analyse zahlreicher Faktoren, deren Bewertung als positiv oder negativ mit der Erwägung eines Kaufs der angebotenen Lösung zusammenhängend postuliert wurde. Die Befragung endete mit Manipulationschecks, einer Selbsteinschätzung der eigenen Fahrfähigkeiten, des Stressempfindens, des subjektiven Sicherheitsgefühls im Straßenverkehr sowie der Abfrage von sozio-ökonomischen Charakteristika der Befragten. Die finale Stichprobe umfasst 545 Befragte. 55,2 Prozent der Befragten sind männlich, das Durchschnittsalter der Befragten ist 42,83 Jahre (Standardabweichung (Std.-Abw.) = 12,62).

32.5 Studie 1

32.5.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte

Gegenstand der ersten Studie ist die laborexperimentelle Überprüfung des Einflusses, den die Markenstärke auf die Konsumentenakzeptanz eines automatisierten Fahrsystems besitzt. Hierzu wurden die Probanden gebeten, eine fiktive Pressemitteilung aufmerksam zu lesen, in der die Einführung eines Autobahnpiloten angekündigt wird, bei dem der Fahrer jedoch jederzeit in das Fahrgeschehen eingreifen kann. Zur Isolierung von potenziellen Effekten der unterschiedlichen Markenstärke der Anbieter (starke versus schwache Marken) und möglicher Unterschiede in der Vertrauenswürdigkeit der Akteure aufgrund unterschiedlicher Expertise (Automobilhersteller versus Technologiekonzerne) wurden ver-

| Nachrichten | Automobilbranche | Kurzmeldungen |

08. Juli 2014

09:45 MESZ

[Marke] demonstriert automatisiertes Fahren auf der Autobahn – Markteinführung ab Mitte 2015

Berlin (dpa). Wie **[Marke]** heute bekannt gab, wird im Zuge der jährlichen Fahrzeug-Updates **ab Mitte 2015** ein optionales Modul namens ADX (englisch für „Automated Driving Experience“) für alle Fahrzeugklassen der Marke **[Marke]** angeboten, mit dem **auf deutschen Autobahnen ein vollautomatisiertes Fahren** möglich wird.

Der Fahrer kann nach der Auffahrt auf die Autobahn das ADX-System mit einem einfachen Knopfdruck einschalten. Das ADX ist mit dem Navigationssystem verknüpft und übernimmt nach Aktivierung das zuvor in das Navigationssystem eingegebene Ziel der Reise. **Sämtliche Fahrfunktionen werden dann vom ADX bei einer manuell wählbaren Reisegeschwindigkeit von maximal 160 km/h übernommen.** „Der Fahrer wird somit zum Passagier und kann die Zeit zur Entspannung oder zum Arbeiten nutzen“, sagte PKW-Chef Herbert Müller. Trotzdem kann der Fahrer jederzeit in das Fahrgeschehen eingreifen und die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen. Vor der letzten Autobahnausfahrt vor dem Ziel wird der Fahrer durch ein Akustiksignal alarmiert, um rechtzeitig vor der Ausfahrt wieder die Kontrolle übernehmen zu können. Selbst an schlafende Autofahrer haben die Ingenieure von **[Marke]** gedacht. Falls nach zweifacher Aufforderung keine Übernahme der Fahraktivität durch den Autofahrer erfolgt, fährt das Fahrzeug an der Ausfahrt vorbei, steuert den nächsten Rastplatz an und parkt das Auto automatisch.

Das ADX wird **ab Juli 2015 in allen [Marke] -Modellen** für einen **Aufpreis von 3.500 €** erhältlich sein. „Mit der Einführung des automatisierten Fahrens auf der Autobahn leistet **[Marke]** einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit auf deutschen Straßen“, betonte der PKW-Manager.

Abb. 32.1 Fiktive Pressemeldung der ersten Studie

schiedene Pressemeldungen für die ausgewählten Akteure gestaltet. Das 2×2-Experiment umfasst somit vier verschiedene Szenarien, die sich nur durch die ausgewählte Marke unterscheiden, während alle weiteren Faktoren konstant gehalten werden. Abbildung 32.1 zeigt die in der ersten Studie eingesetzte Pressemeldung.

Insgesamt nahmen 239 Personen an der ersten Befragung teil. Die Befragten sind zwischen den Szenarien ungefähr gleichverteilt, die Zellen sind mit 49 bis 65 Befragten besetzt. Darüber hinaus bestehen keine Unterschiede im Alter und in der Geschlechtsverteilung der Befragten zwischen den Zellen. Zur Überprüfung, ob die Manipulationen der Markenstärke und der Branche von den Befragten unterschiedlich wahrgenommen wurden, wurde die Markeneinstellung als Manipulationscheck gemessen. Die Markeneinstellung drückt die Vorteilhaftigkeit und Stärke der Markenassoziationen aus, eine der beiden Dimensionen der Markenstärke. Da Automobilmarken meist eine sehr hohe Bewusstseinsgegenwärtigkeit (bezogen auf die Erinnerung wie auf die Wiedererkennung) aufweisen, wird in der Messung der Markeneinstellung eine trennschärfere Variable zur Messung von Unterschieden in der Markenstärke gesehen. Die Markeneinstellung wurde mit drei Fragen gemessen, welche die Vorteilhaftigkeit, Sympathie und Leistung der Marke erfassen. Im Ergebnis zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen der starken (Mittelwert (MW) = 5,40; Std.-Abw. = 1,44) und der schwachen (MW = 4,55; Std.-Abw. = 1,55) Automarke (Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,05$). Die Mittelwerte der starken (MW = 5,54; Std.-Abw. = 0,99) und der schwachen (MW = 3,75; Std.-Abw. = 1,79) Technologiemarken unterscheiden sich

ebenfalls signifikant ($p < 0,01$). Neben den Manipulationen wurde der Markenbesitz und Unterschiede in der Innovationsaffinität als Co-Variablen im Modell aufgenommen. Die Kaufintention als abhängige Variable wurde mit drei Fragen gemessen, welche die individuelle Wahrscheinlichkeit messen, ein Fahrzeug der jeweiligen Marke mit dem Autobahnpiloten zum angebotenen Preis von 3500 € zu kaufen bzw. den Kauf zu erwägen. Der Preis wurde in Analogie zu bestehenden Preisen für verschiedene Fahrassistenzsysteme festgelegt. Die Skala erfüllt die geforderten Anforderungen an die Reliabilität der Messung (Cronbachs $\alpha = 0,94$).

Zur Erforschung der Ursachen für die bestehende Varianz in der Kaufbereitschaft wurden die vermuteten Treiber und Barrieren auf der Wahrnehmungsebene abgefragt. Die Probanden wurden gebeten, das angebotene Wertversprechen des Systems (die Vorteilhaftigkeit) zu bewerten und darüber hinaus ihr funktionales Vertrauen, das Preis-/Leistungsverhältnis und das Prestige des automatisierten Fahrsystems einzuschätzen. Diese Mediatoren werden darüber hinaus von der Autonomiewahrnehmung, der Autonomiepräferenz, den Bedenken bezüglich des Schutzes der Privatsphäre, der Sicherheitsbewertung und der Markeneinstellung beeinflusst. Darüber hinaus wird im Modell für den Markenbesitz und für die Tatsache, ob sich die Probanden als frühe Käufer von Technologieinnovationen bezeichnen, kontrolliert. Die Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse zeigen ein valides und reliables Messmodell. Darüber hinaus wurde die Diskriminanzvalidität der im Modell enthaltenen Konstrukte untersucht [24]. Die durchschnittlich erklärte Varianz jedes Konstrukts übertrifft dabei die geteilte Varianz mit allen anderen Konstrukten. Daher kann auf eine ausreichende Reliabilität und Validität des Messmodells der Studie geschlossen werden. Die Ergebnisse des Messmodells und die Fragebatterien werden auf Nachfrage vom Verfasser zur Verfügung gestellt.

32.5.2 Ergebnisse

Die Kaufbereitschaft für den Autobahnpiloten mit Möglichkeit der manuellen Übernahme durch den Fahrer wird von den Befragten eher durchschnittlich bewertet ($MW = 3,30$; Std.-Abw. = $1,81$), ein Ergebnis, welches im Einklang mit der generellen Skepsis gegenüber Neuproduktinnovationen steht. Von den 239 Befragten, die mit einem der vier Szenarien konfrontiert wurden, gaben 17,2 Prozent eine hohe oder sehr hohe Kaufbereitschaft für das automatisierte Fahrsystem an. Hingegen geben mehr als ein Drittel der Befragten (39,1 Prozent) der Stichprobe an, dass es (sehr) unwahrscheinlich ist, dass sie das System in näherer Zukunft kaufen würden. Die Ergebnisse zeigen, dass es bereits heute ein größeres Marktsegment gibt, das sich den Kauf eines automatisierten Fahrsystems vorstellen kann, jedoch auch noch Akzeptanzprobleme aufweist. Daher wird in einem nächsten Schritt untersucht, ob die Ergebnisse sich in Abhängigkeit von der Markenstärke des Anbieters und dem Industriesektor unterscheiden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Markenstärke und des Industriesektors wurde eine Varianzanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Haupteffekt der

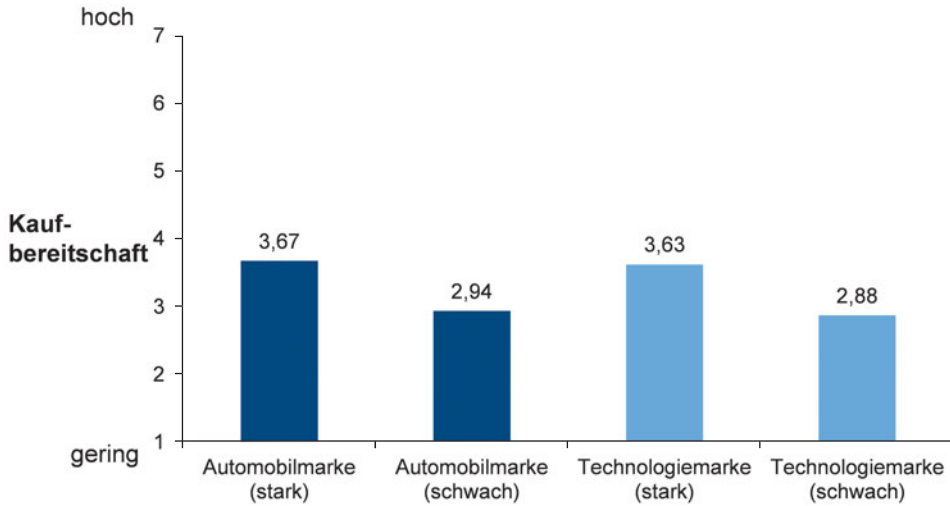


Abb. 32.2 Kaufbereitschaft für einen Autobahnpiloten in Abhängigkeit der Anbietermarke

Markenstärke ($p < 0,01$), und nicht-signifikante Effekte des Industriesektors des Unternehmens (Automobilhersteller versus Technologiekonzern) sowie des Interaktionsterms. Darüber hinaus erklären die Co-Variablen Innovationsaffinität und Besitz der abgefragten Fahrzeugmarke einen Teil der Varianz der Kaufbereitschaft. Die deskriptiven Ergebnisse der Untersuchung sind in Abb. 32.2 dargestellt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Kaufbereitschaft von der Markenstärke positiv beeinflusst wird, jedoch unabhängig ist von der Branche des Unternehmens (Automobilhersteller oder Technologiekonzern). Die Mittelwerte für die starke Automobilmarke ($MW = 3,67$; Std.-Abw. = 1,91) und die starke Technologiemarkte ($MW = 3,63$; Std.-Abw. = 1,70) sind auf dem gleichen Niveau. Die Werte für die Kaufbereitschaft der vergleichsweise schwächeren Automobilmarke ($MW = 3,01$; Std.-Abw. = 1,81) und der schwächeren Technologiemarkte ($MW = 2,88$; Std.-Abw. = 1,82) unterscheiden sich ebenfalls nicht.

Zur Untersuchung der Richtung und relativen Effektstärke der Einflussgrößen auf die Kaufbereitschaft wurde ein Strukturgleichungsmodell geschätzt. Die Pfadkoeffizienten β stellen dabei die Stärke und Richtung des Einflusses der unabhängigen Variablen auf die abhängigen Variablen innerhalb einer theoretisch möglichen Bandbreite von -1 bis $+1$ dar. Die Ergebnisse zeigen, dass das funktionale Vertrauen der stärkste Treiber der Kaufbereitschaft ist ($\beta = 0,432$; $p < 0,01$), gefolgt von der wahrgenommenen Vorteilhaftigkeit des dargestellten Autobahnpiloten ($\beta = 0,237$, $p < 0,01$). Die anderen Mediatoren stehen ebenfalls in einem signifikant positiven Zusammenhang mit der Kaufbereitschaft, sind aber vergleichsweise unwichtiger (Preis-/Leistungsverhältnis $\beta = 0,124$, $p < 0,05$; symbolischer Wert $\beta = 0,117$, $p < 0,05$; Innovationsaffinität $\beta = 0,169$, $p < 0,01$). Die Autonomiepräferenz wirkt sich hingegen signifikant negativ auf die Kaufbereitschaft aus ($\beta = -0,138$, $p < 0,01$). Entgegen der Erwartungen hängen die Unterschiede in der Beurteilung der Bedenken hin-

sichtlich der Privatsphäre nicht signifikant mit der Kaufbereitschaft zusammen ($\beta = 0,012$, $p > 0,1$). Insgesamt werden durch das Modell 67,9 Prozent der Varianz der gemessenen Kaufbereitschaft erklärt.

Das funktionale Vertrauen wird signifikant positiv von der Sicherheitswahrnehmung ($\beta = 0,383$, $p < 0,01$), der wahrgenommenen Autonomie ($\beta = 0,327$, $p < 0,01$), der Innovationsaffinität ($\beta = 0,163$, $p < 0,01$) und der Markeneinstellung ($\beta = 0,130$, $p < 0,01$) beeinflusst. Insgesamt werden 71,8 Prozent der Varianz des funktionalen Vertrauens erklärt. Das Kernwertversprechen des Autobahnpiloten – die wahrgenommene Vorteilhaftigkeit – wird stark positiv von der wahrgenommenen Autonomie ($\beta = 0,598$, $p < 0,01$) und negativ von der Autonomiepräferenz ($\beta = -0,298$, $p < 0,01$) beeinflusst. Die Markeneinstellung wirkt sich positiv auf die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit aus ($\beta = 0,238$, $p < 0,01$). Bei den übrigen postulierten Einflussfaktoren bestehen hingegen keine signifikanten Effekte. Die Faktoren erklären insgesamt 63,3 Prozent der Varianz in der wahrgenommenen Vorteilhaftigkeit. Gleichmaßen wird das Preis-/Leistungsverhältnis stark positiv von der Autonomiewahrnehmung ($\beta = 0,450$, $p < 0,01$) und negativ von der Autonomiepräferenz ($\beta = -0,122$, $p < 0,05$) beeinflusst. Darüber hinaus beurteilen innovationsaffine Konsumenten das Preis-/Leistungsverhältnis des Autobahnpiloten vorteilhafter ($\beta = 0,241$, $p < 0,01$). Die Markeneinstellung trägt darüber hinaus ebenfalls signifikant positiv zur Erklärung der Beurteilung des Preis-/Leistungsverhältnisses bei ($\beta = 0,131$, $p < 0,05$). Insgesamt werden 42,8 Prozent der Varianz des Preis-/Leistungsverhältnisses durch das Modell erklärt. Der symbolische Wert wird des Weiteren stark von den Unterschieden in der Beurteilung der Markeneinstellung beeinflusst ($\beta = 0,575$, $p < 0,01$) und zu 33,1 Prozent erklärt.

Die Ergebnisse der ersten Studie bieten somit bereits relevante Erkenntnisse hinsichtlich der relativen Bedeutung von Treibern und Barrieren der Kaufbereitschaft für einen optionalen Autobahnpiloten. Noch wichtiger als die wahrgenommene Vorteilhaftigkeit wird das funktionale Vertrauen vom Modell als der kritischste Faktor identifiziert, der die Kaufbereitschaft beeinflusst. Neben der Kommunikation des zentralen Nutzenversprechens (der Vorteilhaftigkeit) sollte das Marketing daher insbesondere auf die Wahrnehmung der Sicherheit und Autonomie achten, da diese Variablen indirekt mit der Zielvariable, der Kaufbereitschaft, zusammenhängen. Starke Marken können einen wichtigen Beitrag zur Vermarktung der automatisierten Fahrtechnologie leisten, da die Unterschiede in der Markeneinstellung im Modell einen positiven Zusammenhang mit dem symbolischen Wert, dem Preis-/Leistungsverhältnis, der Vorteilhaftigkeit und dem funktionalen Vertrauen aufweisen. Wie oben gezeigt, unterscheiden die Befragten hierbei nicht zwischen den Marken der Automobilhersteller und den Technologiemarken. Daher können starke Marken von Technologiekonzernen wie Apple oder Google die Wettbewerbsposition der etablierten Automobilhersteller gefährden, und zwar insbesondere derjenigen Hersteller, deren Marke vergleichsweise schwach ist. Vor diesem Hintergrund wird in der zweiten Studie untersucht, ob schwache (starke) Automobilmarken von einer Markenallianz mit einer starken Technologiemarke profitieren können.

32.6 Studie 2

32.6.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte

Die zweite Studie untersucht, ob Kundenakzeptanz und Kaufbereitschaft durch das Zusammenspiel von Automobilhersteller und Technologiepartner in Form einer Markenallianz positiv beeinflusst werden. Die Ergebnisse der Markenallianz-Szenarien werden mit den Resultaten der Einzelmarkenstrategien aus der Studie 1 verglichen. Ebenso wie in Studie 1 wurden die Befragten mit jeweils einem der zwei zusätzlichen Szenarien konfrontiert und darum gebeten, eine fiktive Pressemitteilung zur Ankündigung der Einführung eines AutobahnpiLOTS mit Eingriffsmöglichkeit des Fahrers in das aktuelle Fahrgeschehen zu lesen. Die Pressemeldung wurde im Vergleich zur Variante der ersten Studie so modifiziert, dass ein zweiter Markenname in den Titel und beide Markennamen in den Text der Mitteilung integriert wurden. Das Modell wurde wiederum auf Basis von Daten aus einer Online-Befragung unter Mitgliedern eines Online-Panel-Anbieters getestet. Die Selektionskriterien für die Stichprobe waren hierbei identisch mit denen der ersten Studie, und das Erhebungsinstrument wies die identische Struktur auf.

Über die Teilnehmer der ersten Studie hinausgehend nahmen 92 zusätzliche Befragte an der Erhebung zur zweiten Studie teil. Die Probanden sind zwischen den beiden Zellen annähernd gleichverteilt mit Zellgrößen von 45 bzw. 47 Befragten. Zwischen den beiden Zellen konnten keine Unterschiede hinsichtlich der Alters- und Geschlechtsverteilung festgestellt werden. Die Ergebnisse des Manipulationschecks bezogen auf Unterschiede in der Markeneinstellung verdeutlichen, dass signifikante Unterschiede ($p < 0,01$) zwischen der starken (MW = 5,35; Std.-Abw. = 1,62) und der schwachen Automobilherstellermarke (MW = 4,74; Std.-Abw. = 1,49) bestehen. Darüber hinaus wird die im Markenallianz-Szenario eingesetzte Technologiemarken signifikant positiver bewertet als die schwache Automobilmarke, wohingegen kein signifikanter Unterschied zur starken Automobilmarke besteht (MW = 5,50; Std.-Abw. = 1,01). Die Kaufbereitschaft wurde analog zur ersten Studie mit drei Fragen gemessen, darüber hinaus wurden die gleichen Co-Variablen aufgenommen. Das Strukturgleichungsmodell wurde ebenfalls repliziert, um mögliche Erklärungsansätze für bestehende Unterschiede in der Kaufbereitschaft feststellen zu können. Das Messmodell wurde bezogen auf die Kriterien der Reliabilität und Validität überprüft und zeigt eine gute Erfüllung der erforderlichen Bedingungen.

32.6.2 Ergebnisse

Zur Überprüfung der vermuteten Effekte wurde zunächst eine Varianzanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Haupteffekt des Co-Branding ($p < 0,01$) und einen signifikanten Einfluss der Innovationsaffinität der befragten Konsumenten auf die Kaufbereitschaft. Entgegen der Erwartung ist der Einfluss des Co-Branding auf die Kauf-

bereitschaft negativ. Die abhängige Variable verschlechtert sich von 3,67 auf 2,67 (Std.-Abw. = 1,93) für die starke Automobilmarke und von 3,01 auf 2,78 (Std.-Abw. = 1,80) für die schwache Automobilmarke. Zumindest für die schwache Automobilmarke wäre es aus theoretischer Sicht naheliegend, dass aus der Verbindung mit einer relativ attraktiveren Technologiemarkte positive Effekte auf die Kaufbereitschaft resultieren. Zur Analyse möglicher Erklärungsansätze für dieses Ergebnis wurde ein Strukturgleichungsmodell geschätzt. Die Analyseergebnisse weisen zum Teil deutliche Abweichungen zu den in Studie 1 berichteten Resultaten auf. So ist die Bedeutung des funktionalen Vertrauens im Falle einer Markenallianz noch bedeutsamer zur Erklärung der Kaufbereitschaft ($\beta = 0,747$, $p < 0,01$), als dies ohnehin schon im Falle einer Einzelmarkenstrategie ist. Die Beurteilung des Preis-/Leistungsverhältnisses besitzt wie gehabt einen signifikant positiven Einfluss auf die Kaufbereitschaft auf ($\beta = 0,180$, $p < 0,01$), während für die übrigen Variablen keine signifikanten Effekte festgestellt werden können. Der Einfluss des Sicherheitsempfindens auf das funktionale Vertrauen ist darüber hinaus stärker als im Falle einer Einzelmarkenstrategie ($\beta = 0,550$, $p < 0,01$). Die Autonomiewahrnehmung weist ebenfalls einen signifikant positiven, aber etwas schwächeren Effekt auf das funktionale Vertrauen auf ($\beta = 0,208$, $p < 0,05$).

Die Ergebnisse legen nahe, dass die Bewertung des automatisierten Fahrsystems durch eine Markenallianz zwischen einem Automobilhersteller und einer Technologiemarkte nicht verbessert wird – und zwar unabhängig davon, ob die Technologiemarkte gleich oder besser im Vergleich zur Automobilmarke bewertet wird. Die Konsumenten bilden ihre Kaufbereitschaft in einem starken Maße basierend auf ihrer Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit des Angebots aus. Diese wird im Wesentlichen von den Sicherheitsbedenken und der Autonomiewahrnehmung beeinflusst. Im Falle einer starken Automobilmarke werden die Sicherheitsbedenken bei einer Markenallianz mit einer Technologiemarkte sogar noch negativer bewertet (MW = 4,15, Std.-Abw. = 1,82; $p < 0,05$) als bei einer Einzelmarkenstrategie (MW = 4,94, Std.-Abw. = 1,65). Für die vergleichsweise schwache Automobilmarke konnte dieser Effekt nicht nachgewiesen werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der zweiten Studie somit auf, dass Automobilhersteller und Technologiekonzerne wie Apple oder Google den besonderen Nutzen einer potenziellen Markenallianz stärker herausstellen müssen. Konsumenten sehen in einer solchen Partnerschaft ein höheres Risiko, somit spielt das funktionale Vertrauen für die Adoption von automatisierten Fahrsystemen eine entscheidende Rolle.

Zur Überprüfung der Generalisierbarkeit der Ergebnisse wird im folgenden Abschnitt die Studie unter Verwendung zweier alternativer Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens repliziert.

32.7 Studie 3

32.7.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte

Die dritte Studie untersucht den Einfluss unterschiedlicher Anwendungsszenarien des automatisierten Fahrens, jeweils angeboten von einer schwachen bzw. starken Marke. Über den in den Studien 1 und 2 als Stimulus genutzten Autobahnpiloten hinaus werden zwei weitere Szenarien eingeführt, die ein geringeres persönliches Risiko (automatisiertes Valet-Parken) und ein besonders hohes persönliches Risiko (vollautomatisiertes Fahren ohne manuelle Steuermöglichkeit) beinhalten. Nachfolgend sind die in der dritten Studie verwendeten Pressemitteilungen wiedergegeben.

Anwendungsfall 2: Vollautomatisiertes Fahrzeug, geringes persönliches Risiko

[Marke] demonstriert vollautomatisiertes Parken der nächsten Generation – Markteinführung ab Mitte 2015

Berlin (dpa). Wie [Marke] heute bekannt gab, wird im Zuge der jährlichen Fahrzeug-Updates **ab Mitte 2015** ein optionales Modul namens APT (englisch für „Automated Parking Technology“) für alle Fahrzeugklassen der Marke [Marke] angeboten, mit dem **Parken vollautomatisiert** wird.

Der Fahrer kann nun in der Innenstadt einfach am gewünschten Zielort aussteigen. Mit dem Smartphone kann er das APT-System aktivieren das, dann selbstständig innerhalb eines Radius von 5 km einen kostenfreien Parkplatz sucht. **Sämtliche Fahrfunktionen werden vom APT bei einer Geschwindigkeit von maximal 30 km/h übernommen.** „Der Fahrer wird somit zum Passagier und kann speziell in Innenstädten direkt den gewünschten Zielort erreichen – um das Parken kümmert sich dann das Auto“, sagte PKW-Chef Herbert Müller. Auch nach einem Geschäftstermin oder Theaterbesuch kann das Auto per Smartphone aktiviert und zu einem frei wählbaren Ort bestellt werden. Das Auto bleibt hierbei für Dritte – mit Ausnahme der Polizei – stets verschlossen.

Das APT-System wird **ab Juli 2015 in allen [Marke]-Modellen** für einen **Aufpreis von 3.500 €** erhältlich sein. „Mit der Einführung des vollautomatisierten Parkens leistet das APT einen wertvollen Beitrag zur Stressreduktion bei der Suche nach knappen Parkplätzen“, betonte der Pkw-Manager.

Anwendungsfall 3: Vollautomatisiertes Fahrzeug, hohes persönliches Risiko

[Marke] demonstriert vollautomatisiertes Fahren – Markteinführung ab Mitte 2015

Berlin (dpa). Wie [Marke] heute bekannt gab, wird im Zuge der jährlichen Fahrzeug-Updates **ab Mitte 2015** ein optionales Modul namens ADR (englisch für „Automated Driving Robot“) für alle Fahrzeugklassen der Marke [Marke] angeboten, mit dem **auf allen deutschen Straßen ein vollautomatisiertes Fahren** möglich wird.

Die Interaktion zwischen Passagier und Fahrzeug erfolgt hierbei über das Navigationssystem. Nach Eingabe des Zielorts wird das Fahrzeug komplett selbstständig bewegt und

erlaubt keine Eingriffe durch den Nutzer. Lediglich eine Änderung des Zielorts, der Route und eine Notstopfunktion zum sicheren Halt und Verlassen des Fahrzeugs sind vorgesehen.

Sämtliche Fahrfunktionen werden dann vom ADR bei einer manuell wählbaren Reisegeschwindigkeit von maximal 160 km/h (Autobahn) übernommen. „Der Fahrer wird somit zum Passagier und kann die Zeit zur Entspannung oder zum Arbeiten nutzen“, sagte Pkw-Chef Herbert Müller. „Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass der Fahrroboter zuverlässiger auf Gefahrensituationen reagiert als der Mensch“, so Müller weiter. Gerade nach Phasen der Inaktivität der Passagiere sei die Gefahr des Überreagierens hoch, daher würde bei [Marke] konsequent auf vollautomatisiertes Fahren gesetzt. Trotzdem haben die Ingenieure von [Marke] an Notsituationen gedacht, so können Nutzer jederzeit intervenieren. Dann wird ein sicherer Haltepunkt angefahren.

Das ADR wird **ab Juli 2015 in allen [Marke]-Modellen** für einen **Aufpreis von 3.500 €** erhältlich sein. „Mit der Einführung des vollautomatisierten Fahrens leistet [Marke] einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit auf deutschen Straßen“, betonte der Pkw-Manager.

Eine starke und eine schwache Automobilmarke wurden jeweils in Verbindung mit den beiden weiteren Anwendungsfällen getestet, sodass sich insgesamt vier zusätzliche Szenarien ergeben. Analog zu den Studien 1 und 2 wurde jeder Proband mit einem der vier Szenarien konfrontiert und gebeten, eine fiktive Pressemitteilung aufmerksam zu lesen, in der die Einführung eines automatisierten Valet-Parkens bzw. eines vollautomatisierten Fahrzeugs angekündigt wurde. Das konzipierte Modell wurde wiederum auf Basis von Daten einer Befragung von Konsumenten eines Online-Panels getestet. Die Kriterien der Stichprobenauswahl sind identisch mit den ersten beiden Studien, die Struktur der Umfrage wurde ebenfalls beibehalten.

In Summe setzt sich die Stichprobe der dritten Studie aus 342 Befragten zusammen. Die Probanden sind in etwa gleichverteilt zwischen den sechs Szenarien (drei Anwendungsfälle x starke/schwache Marke). Die Zellen umfassen zwischen 49 und 65 Probanden, zwischen den Zellen konnten keine Unterschiede hinsichtlich der Alters- oder Geschlechtsverteilung festgestellt werden. Im Einklang mit den vorangegangenen Studien wurde die Kaufbereitschaft mit drei Fragen gemessen und die gleichen Co-Variablen aufgenommen. Das Strukturgleichungsmodell wurde ebenfalls in der gleichen Modellstruktur repliziert, um mögliche Einflussfaktoren der Kaufbereitschaft zu identifizieren und einen Modellvergleich zu ermöglichen. Das Messmodell erfüllt die gängigen Reliabilitäts- und Validitätskriterien.

32.7.2 Ergebnisse

Die zwei zusätzlichen Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens werden von den Befragten im Vergleich zum Autobahnpiloten leicht anders wahrgenommen. Im Durchschnitt ist die Kaufbereitschaft für das automatisierte Valet-Parken etwa auf dem gleichen Niveau ($MW = 3,59$; $Std.-Abw. = 1,93$), während das vollautomatisierte Fahrzeug ohne Möglich-

keit der manuellen Fahrtübernahme deutlich schlechter beurteilt wird ($MW = 2,97$; Std.-Abw. = 1,83). Ein Anteil von 18,6 Prozent der 113 Befragten, die um die Beurteilung des vollautomatisierten Valet-Parkens gebeten wurden, gibt eine hohe bis sehr hohe Kaufbereitschaft für das angebotene System an. Dieser Wert ist sogar noch etwas höher als die 17,2 Prozent der Befragten, die sich den Kauf eines Autobahnpiloten vorstellen können (vgl. Studie 1). Der Anteil von 38,9 Prozent der Stichprobe, die sich den Kauf des dargestellten Fahrautomaten nicht vorstellen können, liegt auf dem gleichen Niveau wie der Anteil der Skeptiker aus Studie 1. Wie der Vergleich der Mittelwerte der Kaufbereitschaften schon nahelegt, ist der Anteil der Befragten, die sich den Kauf eines vollautomatisierten Fahrzeugs vorstellen können, mit 10,9 Prozent der Stichprobe deutlich niedriger. Fast die Hälfte der Stichprobe von 101 Befragten gab an, dass es (sehr) unwahrscheinlich ist, dass sie das dargestellte System in näherer Zukunft in Erwägung ziehen würden. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die unterschiedlichen Anwendungsfälle einen deutlichen Einfluss auf die Kaufbereitschaft für Systeme des automatisierten Fahrens ausüben. In einem weiteren Schritt wurden die Einflüsse der Anwendungsfälle und der Markenstärke im Rahmen einer Varianzanalyse untersucht. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Haupteffekt der Anwendungsfälle ($p < 0,05$), während der Haupteffekt der Markenstärke und der Interaktionsterm keine Signifikanz aufweisen.

Zur Analyse möglicher Erklärungen für die beobachteten Unterschiede in der Kaufbereitschaft wurde ein Mehrgruppen-Strukturgleichungsmodell geschätzt. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede des Modells in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall. So ist beim automatisierten Valet-Parken die relative Bedeutung des funktionalen Vertrauens ($\beta = 0,170$, $p < 0,1$) viel geringer, der symbolische Wert hat keinen Einfluss ($\beta = 0,08$, $p > 0,1$) auf die Kaufbereitschaft. Der Einfluss des Preis-/Leistungsverhältnisses ist etwas größer ($\beta = 0,146$, $p < 0,1$), die Innovationsaffinität ist weniger bedeutsam ($\beta = 0,122$, $p < 0,1$). Der wichtigste Treiber der Kaufbereitschaft ist die wahrgenommene Vorteilhaftigkeit ($\beta = 0,445$, $p < 0,01$). Die Einschätzung des funktionalen Vertrauens hängt im Vergleich zum ersten Anwendungsfall stärker von der Bewertung der Sicherheit ($\beta = 0,469$, $p < 0,01$) und der Autonomiepräferenz ab ($\beta = -0,165$, $p < 0,1$), während die übrigen Treiber und Barrieren vergleichbare Effektstärken aufweisen. Darüber hinaus hängt die Bewertung der Vorteilhaftigkeit als zentrales Wertversprechen stärker davon ab, ob die Befragten die Autonomie durch das automatisierte Parken wertschätzen ($\beta = 0,640$, $p < 0,01$), und davon, wie stark die Autonomiepräferenz ausgeprägt ist ($\beta = -0,436$, $p < 0,01$). Insgesamt kann konstatiert werden, dass die erfolgreiche Einführung eines vollautomatisierten Valet-Parkens hauptsächlich von der geeigneten Kommunikation der Vorteilhaftigkeit abhängt. Im Vergleich zu anderen Anwendungsfällen spielen funktionale Vorbehalte eine nachgelagerte Rolle.

Beim Anwendungsfall des vollautomatisierten Fahrzeugs ohne manuelle Fahrmöglichkeit hängt die Kaufbereitschaft stark vom funktionalen Vertrauen ab ($\beta = 0,477$, $p < 0,01$). Darüber hinaus spielt der symbolische Wert eine stärkere Rolle für die Erklärung der Kaufbereitschaft ($\beta = 0,254$, $p < 0,05$). Die Wahrnehmung der Vorteilhaftigkeit und die verbleibenden Treiber und Barrieren sind weniger bedeutsam. Das funktionale Vertrauen wird

im Vergleich zu den anderen Anwendungsfällen stärker durch die Wahrnehmung der Autonomie ($\beta = 0,447$, $p < 0,01$) und der Autonomiepräferenz ($\beta = -0,260$, $p < 0,01$) beeinflusst, während dem Sicherheitsempfinden eine etwas geringere Bedeutung zukommt ($\beta = 0,256$, $p < 0,05$). Die wahrgenommene Vorteilhaftigkeit hängt wiederum in einem geringeren Maße von der Autonomiewahrnehmung ab ($\beta = 0,380$, $p < 0,01$), dafür in einem umso stärkeren Maße von der Autonomiepräferenz ($\beta = -0,394$, $p < 0,01$). Diese Ergebnisse lassen eine starke Selbstselektion der Konsumenten erwarten, da Autofahrer mit stark ausgeprägter Autonomiepräferenz vom Kauf eines vollautomatisierten Automobils absehen werden. Vor dem Hintergrund der geringen Kaufbereitschaft der meisten Befragten kann schlussgefolgert werden, dass die Vision des vollautomatisierten Automobils zum gegenwärtigen Zeitpunkt für die meisten Menschen noch nicht attraktiv ist.

32.8 Zusammenfassung und Ausblick

Die aus den drei experimentellen Studien gewonnenen Erkenntnisse leisten einen Beitrag zum Verständnis der Treiber einer individuellen Kaufentscheidung für automatisierte Fahrzeuge. Im Gegensatz zu den relativ positiven Werten der Nutzungsabsicht, die in einer französischen Studie berichtet werden [51], zeigt die vorliegende Analyse auf, dass deutsche Konsumenten der Technologie des automatisierten Fahrens im Mittel relativ skeptisch gegenüberstehen. Da die beiden Studien sich bezogen auf die eingesetzte Methodik und den Informationsumfang, der den Befragten zur Verfügung gestellt wurde, deutlich unterscheiden, ist ein Vergleich der Länderunterschiede auf dieser Basis nicht möglich. Jedoch kann sich auch in der vorliegenden Studie jeder sechste Befragte vorstellen, einen Autobahnpiloten oder einen vollautomatischen Valet-Parkassistenten zu kaufen, unabhängig von der geringen zur Verfügung gestellten Information. Jede zehnte Person weist eine hohe bis sehr hohe Kaufabsicht für vollautomatisierte Fahrzeuge auf, die den Fahrer von jeglichen manuellen Fahreingriffen ausschließen. Diese Zahlen sind vergleichbar mit anderen Konsumentenstudien, welche die Erwägung der Adoption von technologischen Innovationen vor der tatsächlichen Markteinführung erheben. Falls die beschriebenen Systeme aus Kundensicht als nützlich und zuverlässig befunden werden, ist zu erwarten, dass die Akzeptanz im Zeitverlauf steigen wird.

Unabhängig von den psychologischen Wertbeiträgen, die einen Einfluss auf die Kaufbereitschaft ausüben, erklären auch Unterschiede in der individuellen Innovationsaffinität teilweise, warum Konsumenten sich den Kauf eines automatisierten Fahrsystems vorstellen können. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass Befragte mit einer hohen Autonomiepräferenz eine stark negative Haltung gegenüber dieser Technologie aufweisen. Neben der Autonomiepräferenz erklären auch die Unterschiede in der Autonomiewahrnehmung, die aus den Anwendungsfällen des automatisierten Fahrens resultieren, die gemessene Varianz in der Kaufbereitschaft. Anbieter von automatisierten Fahrzeugen müssen daher zumindest in einer Übergangszeit die affinen Zielsegmente definieren und gleichermaßen nicht-automatisierte Fahrzeuge für die eher konservativen Kundensegmente anbieten.

Die zentralen Ergebnisse der drei Studien und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen sind in Tab. 32.1 aufgeführt.

Tab. 32.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Fokus der Analyse	Ergebnisse	Implikationen
Markenstärke und Branchenzugehörigkeit des Anbieters	<ul style="list-style-type: none"> Die Markenstärke des Anbieters beeinflusst die Kaufbereitschaft positiv, unabhängig von der Branchenzugehörigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Die Markenstärke des Anbieters beeinflusst die Kaufbereitschaft positiv, unabhängig von der Branchenzugehörigkeit
Vertikale Markenallianzen	<ul style="list-style-type: none"> Negative Wahrnehmung von Markenallianzen Funktionales Vertrauen, das hauptsächlich durch Sicherheitsbedenken getrieben wird, erklärt die negative Bewertung von Markenallianzen 	<ul style="list-style-type: none"> Funktionales Vertrauen ist ein Kernbestandteil von Automobilmarken. Sicherheitsbedenken müssen ausgeräumt werden, bevor eine Markenallianz eingegangen wird
Unterschiede der Anwendungsfälle <ul style="list-style-type: none"> AutobahnpiLOT mit manueller Fahrmöglichkeit durch den Fahrer Vollautomatisierter Valet-Parkassistent Vollautomatisierter Fahrroboter, ohne manuelle Fahrmöglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Erwägung: 17,2 %, wesentlich beeinflusst durch funktionales Vertrauen und Vorteilhaftigkeit Erwägung: 18,6 %, wesentlich beeinflusst durch die Vorteilhaftigkeit Erwägung: 10,9 %, wesentlich beeinflusst durch funktionales Vertrauen und symbolischen Wert 	<ul style="list-style-type: none"> Bedenken bezüglich der Zuverlässigkeit und der Nützlichkeit müssen adressiert werden Kommunikation des Nutzens des Systems Zuverlässigkeit und Sicherheitsbedenken sind die Hauptbarrieren, ein wichtiger Treiber ist der symbolische Wert

Dieser Beitrag weist einige Einschränkungen auf, die gleichzeitig als Anhaltspunkte für zukünftige Forschungsarbeiten gesehen werden können. So basiert die empirische Studie auf einer – bezogen auf Alter und Geschlecht – repräsentativen Stichprobe der deutschen Bevölkerung. Die Befragten wurden jedoch nicht zu ihrer eigenen Fahrzeugmarke befragt, sondern zu jeweils zwei ausgewählten starken (schwachen) Automobil- bzw. Technologie- marken. Zwar wurde für den Markenbesitz und die Einstellung gegenüber der Marke kontrolliert, trotzdem könnten zukünftige Forschungsarbeiten ausgewählte Fahrzeugklassen mit den korrespondierenden Zielgruppen analysieren, um noch realistischere Ergebnisse zu erhalten. Darüber hinaus kann durch Laborexperimente zwar eine hohe interne Validität erzielt werden, zukünftige Forschungsarbeiten könnten jedoch ein lebhafteres und dadurch realistischeres Szenario des automatisierten Fahrens nutzen, beispielsweise durch die Verwendung von Video-Stimuli statt der in dieser Studie eingesetzten Pressemitteilungen. Zukünf-

tige Studien sollten des Weiteren untersuchen, wie durch automatisierte Fahrzeuge ausgelöste kritische Vorfälle von Konsumenten wahrgenommen werden und wie ihre Wahrnehmungen von den involvierten Marken abhängen. Schließlich sollte die Studie in anderen Kontexten (beispielsweise Ländermärkten) repliziert werden, um mehr über mögliche weitere Rahmenbedingungen der Nutzungsbereitschaft automatisierter Fahrzeuge zu erfahren.

Literatur

1. Aaker D (1996) Building Strong Brands. New York: Free Press
2. Albrecht CM, Backhaus C, Gurzki H, Woisetschlager DM (2013) Drivers of Brand Extension Success: What Really Matters for Luxury Brands. *Psychology & Marketing* 30(8), 647–659
3. Araujo L, Mason K, Spring M (2012) Self-driving cars: A case study in making new markets, Lancaster University
4. Arras KO, Cerqui D (2005). Do we want to share our lives and bodies with robots? A 2000 people survey (No. LSA-REPORT-2005-002)
5. Beiker SA (2012) Legal Aspects of Autonomous Driving. *Santa Clara L. Rev.* 52(4), 1145–1156
6. Brehm JW, Brehm SS (1981) Psychological reactance: A theory of freedom and control. San Diego, CA: Academic Press
7. Berger C (2012) From Autonomous Vehicles to Safer Cars: Selected Challenges for the Software Engineering. In *Computer Safety, Reliability, and Security*. Springer Berlin Heidelberg, 180–189
8. Bitner MJ, Ostrom AL, Meuter ML (2002) Implementing Successful Self-Service Technologies. *The Academy of Management Executive* 16(4), 96–108
9. Broadbent E, Stafford R, MacDonald B (2009) Acceptance of Healthcare Robots for the Older Population: Review and Future Directions. *International Journal of Social Robotics* 1(4), 319–330
10. Brynjolfsson E, McAfee A (2012) Winning the Race with Ever-Smarter Machines. *MIT Sloan Management Review* 53(2), 53–60
11. Burns LD (2013) Sustainable mobility: A vision of our transport future. *Nature* 497(7448), 181–182
12. Cairns S, Harmer C, Hopkin J, Skippon S (2014) Sociological perspectives on travel and mobilities: A review. *Transportation research part A: policy and practice* 63, 107–117
13. Carlson MS, Desai M, Drury JL, Kwak H, Yanco HA (2013). Identifying Factors that Influence Trust in Automated Cars and Medical Diagnosis Systems
14. Chen H, Gong X, HU YF, LIU QF, GAO BZ, GUO HY (2013) Automotive Control: the State of the Art and Perspective. *Acta Automatica Sinica* 39 (4), 322–346
15. Curran JM, Meuter ML, Surprenant CF (2003) Intentions to Use Self-Service Technologies: A Confluence of Multiple Attitudes. *Journal of Service Research* 5 (3), 209–224
16. Curran JM, Meuter ML (2005) Self-service technology adoption: comparing three technologies. *Journal of Services Marketing* 19(2), 103–113
17. Dabholkar PA, Bagozzi RP (2002) An Attitudinal Model of Technology-Based Self-Service: Moderating Effects of Consumer Traits and Situational Factors. *Journal of the Academy of Marketing Science* 30(3), 184–201
18. Dautenhahn K, Woods S, Kaouri C, Walters ML, Koay KL, Werry I (2005) What is a Robot Companion-Friend, Assistant or Butler?. In *Intelligent Robots and Systems, 2005 (IROS 2005)*. 2005 IEEE/RSJ International Conference, 1192–1197
19. Epprecht N, von Wirth T, Stünzi C, Blumer YB (2014) Anticipating transitions beyond the current mobility regimes: How acceptability matters. *Futures* 60, 30–40

20. Farquhar PH (1989) Managing Brand Equity. *Marketing Research*, 1, 24–33 (September)
21. Fagnant DJ, Kockelman, K (2014) Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations for capitalizing on Self-Driven Vehicles. *Transportation Research* 20
22. Fischer M, Hieronymus F, Kranz M (2002) Markenrelevanz in der Unternehmensführung – Messung, Erklärung und empirische Befunde für B2C-Märkte. Arbeitspapier Nr. 1, Marketing Centrum Münster und McKinsey
23. Flemisch F, Kelsch J, Löper C, Schieben A., Schindler J, Heesen, M (2008) Cooperative Control and Active Interfaces for Vehicle Assistance and Automation. In FISITA World automotive Congress
24. Fornell C, Larcker DF (1981) Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39–50
25. Fraedrich E, Lenz B (2014) Automated Driving – Individual and Societal Aspects Entering the Debate. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (TRR)*. 93rd Annual Meeting Transportation Research Board (TRB), 12.–16. Jan. 2014, Washington D.C
26. Garza, AP (2011) “Look Ma, No Hands”: Wrinkles and Wrecks in the Age of Autonomous Vehicles. *New Eng. L. Rev.* 46, 581–615
27. Goodall NJ (2014). Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes. In *TRB Annual Meeting*, Washington DC
28. Goodall NJ (2014) Machine Ethics and Automated Vehicles. *Road Vehicle Automation*. Springer, 93–102
29. Heide A, Henning K (2006) The “cognitive car”: A roadmap for research issues in the automotive sector. *Annual reviews in control* 30(2), 197–203
30. Hevelke A, Nida-Rümelin J (2014) Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis. *Science and Engineering Ethics*, 1–12
31. Huijnen C, Badii A, van den Heuvel H, Caleb-Solly P, Thiemert D (2011) Maybe it becomes a buddy, but do not call it a robot–seamless cooperation between companion robotics and smart homes. In *Ambient Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg, 324–329
32. IHS Automotive (2014) Automotive Technology Research. Emerging Technologies, Autonomous Cars – Not if, but when. http://orfe.princeton.edu/~alaink/SmartDrivingCars/PDFs/IHS%20_EmergingTechnologies_AutonomousCars.pdf, last accessed on July 25th 2014
33. Keller KL (1993) Conceptualizing, measuring, and managing customer-based brand equity. *Journal of Marketing* 57(1), 1–22
34. Keller KL (2012) *Strategic Brand Management – Building, Measuring, and Managing Brand Equity*, 4th revised edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
35. Khan AM, Bacchus A, Erwin S (2012) Policy challenges of increasing automation in driving. *IATSS research* 35(2), 79–89
36. KPMG (2012) Self-Driving Cars-The next revolution. <http://www.kpmg.com/US/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-next-revolution.pdf>, last accessed on July 25th 2014
37. KPMG (2013) Self-Driving Cars-Are We Ready? <http://www.kpmg.com/US/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-are-we-ready.pdf>, last accessed on July 25th 2014
38. Kuo IH, Rabindran JM, Broadbent E, Lee YI, Kerse N, Stafford RMQ, MacDonald BA (2009) Age and gender factors in user acceptance of healthcare robots. In *Robot and Human Interactive Communication*, 2009. The 18th IEEE International Symposium. Toyama, Japan, 214–219
39. Lassar W, Mittal B, Sharma A (1995) Measuring customer-based brand equity. *Journal of consumer marketing* 12 (4), 11–19
40. Levin IP, Levin, AM (2000) Modeling the Role of Brand Alliances in the Assimilation of Product Evaluations. *Journal of Consumer Psychology* 9 (1), 43–52

41. Lin TW, Hwang SL, Green PA (2009) Effects of time-gap settings of adaptive cruise control (ACC) on driving performance and subjective acceptance in a bus driving simulator. *Safety Science* 47(5), 620–625
42. Litman T (2014) Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Implications for Transport Planning
43. Lutin JM, Kornhauser AL, Lerner-Lam E (2013) The Revolutionary Development of Self-Driving Vehicles and Implications for the Transportation Engineering Profession. *ITE Journal* 83 (7), 28–32
44. Maak N (2014) Googles „Self-Driving Car“ – In welche Zukunft fahren wir? Unter: <http://www.faz.net/aktuell/feuilleton/debatten/googles-self-driving-car-wohin-fahren-wir-13002612.html?printPagedArticle=true#Drucken>, last accessed on July 25th 2014
45. Marchau VAWJ, van der Heijden RECM (1998) Policy aspects of driver support systems implementation: results of an international Delphi study. *Transport Policy* 5(4), 249–258
46. Meseko AA (2014) The Influence of Disruptive Innovations in A Cardinaly Changing World Economy. *Journal of Economics and Sustainable Development* 5(4), 24–27
47. Meuter ML, Ostrom AL, Roundtree RI, Bitner MJ (2000). Self-Service Technologies: Understanding Customer Satisfaction with Technology-Based Service Encounters. *Journal of Marketing* 64(3), 50–64
48. Meyer G, Beiker S (2014) Road Vehicle Automation. Heidelberg
49. Oestreicher L, Eklundh KS (2006) User Expectations on Human-Robot Co-operation. In *Robot and Human Interactive Communication, 2006. ROMAN 2006. The 15th IEEE International Symposium*, 91–96
50. Özgüner Ü, Stiller C, Redmill K (2007) Systems for Safety and Autonomous Behavior in Cars: The DARPA Grand Challenge Experience. *Proceedings of the IEEE* 95(2), 397–412
51. Payre W, Cestac J, Delhomme P (2014) Intention to use a fully automated car: Attitudes and a priori acceptability. *Transportation Research Part F*, in press
52. Rakotonirainy A, Soro A, Schroeter R (2014) Social Car Concepts to Improve Driver Behaviour. *Pervasive and Mobile Computing*
53. Rao AR, Qu L, Ruekert, RW (1999) Signaling Unobservable Product Quality Through a Brand Ally. *Journal of Marketing Research* 36(2), 258–268
54. Reddy R (1996) The Challenge of Artificial Intelligence. *Computer* 29 (10), 86–98
55. Reece DA (1992) Selective Perception for Robot Driving (No. CMU-CS-92-139), Doctoral Thesis in the field of Computer Science, School of Computer Science. Carnegie Mellon University, Pittsburgh
56. Rupp JD, King AG (2010). Autonomous Driving-A Practical Roadmap (No. 2010-01-2335). SAE Technical Paper
57. Schaefers T (2013) Exploring Carsharing Usage Motives: A Hierarchical Means-End Chain Analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 47(1), 69–77
58. Seidel M, Loch CH, Chahil S (2005) Quo Vadis, Automotive Industry? A Vision of Possible Industry Transformations. *European Management Journal* 23(4), 439–449.
59. Silverman SN, Sprott DE, Pascal VJ (1999) Relating consumer-based sources of brand equity to market outcomes. *Advances in Consumer Research* 26, 352–358
60. Simon F, Usunier JC (2007) Cognitive, demographic, and situational determinants of service customer preference for personnel-in-contact over self-service technology. *International Journal of Research in Marketing* 24 (2), 163–173
61. Simonin BL, Ruth JA (1998) Is a Company Known by the Company it Keeps? Assessing the Spillover Effects of Brand Alliances on Consumer Brand Attitudes. *Journal of Marketing Research* 35 (1), 30–42
62. Soriano BC, Dougherty SL, Soublet BG, Triepke KJ (2014) Autonomous Vehicles: A Perspective from the California Department of Motor Vehicles. In *Road Vehicle Automation*, Springer International Publishing, 15–24

63. Trimble TE, Bishop R, Morgan JF, Blanco M (2014) Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts: Past research, state of automation technology, and emerging system concepts. (Report No. DOT HS 812 043). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration
64. Vahidi A, Eskandarian A (2003) Research Advances in Intelligent Collision Avoidance and Adaptive Cruise Control. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 4(3), 143–153
65. Venkatesh V, Morris MG, Davis FD, Davis GB (2003) User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27 (3), 425–478
66. Wallace R (2013) Self-Driving Cars: The Next Revolution. Global Symposium on Connected Vehicles (5–8 August), Traverse City Michigan USA
67. Weijters B, Rangarajan D, Falk T, Schillewaert N. (2007) Determinants and Outcomes of Customers' Use of Self-Service Technology in a Retail Setting. *Journal of Service Research* 10 (1), 3–21
68. Woisetschlager D, Michaelis M, Backhaus C (2008) The “Dark Side” of Brand Alliances: How the Exit of Alliance Members Affects Consumer Perceptions. *Advances in Consumer Research* 35, 483–490
69. Wunderlich N (2010) Acceptance of Remote Services: Perception, Adoption, and Continued Usage in Organizational Settings. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
70. Wunderlich N, Wangenheim F, Bitner MJ (2012) High Tech and High Touch: A Framework for Understanding User Attitudes and Behaviors Related to Smart Interactive Services. *Journal of Service Research* 16 (1), 3–20
71. Zhu Z, Nakata C, Sivakumar K, Grewal D (2007) Self-service technology effectiveness: the role of design features and individual traits. *Journal of the Academy of Marketing Science* 35(4), 492–506